

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA TELEKOMUNIKAČNÍ TECHNIKY

STUDIUM VAZEBNÍCH PODMÍNEK PRO KVAZI
JEDNOVIDOVÁ OPTICKÁ VLÁKNA
STUDY OF QUASI SINGLE-MODE OPTICAL FIBER
COUPLING CONDITIONS

2012

Bc. Petr Žinčík

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Žinčík**
Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2612T059 Mobilní technologie
Téma: Studium vazebních podmínek pro kvazijednovodová optická vlákna
Study of Quasi Single-Mode Optical Fiber Coupling Conditions

Zásady pro vypracování:

- 1.) Popis vlastností kvazijednovodových optických vláken.
- 2.) Sestavení experimentálního pracoviště pro navazování světla do kvazijednovodových optických vláken.
- 3.) Provést reprodukovatelná měření vazeb pro různé typy kvazijednovodových optických vláken.
- 4.) Vyhodnocení naměřených výsledků z měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

ŠIŠKA, P. *Studium a modelování módové vazby v optických vláknech v blízkosti normalizované frekvence*. Ostrava, 2009. Disertační práce. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc., VŠB-TU Ostrava.

SALEH, Bahaa E. A.; TEICH, Malvin Carl. *Základy fotoniky*. Vydání 1. Praha: Matfyzpress, 1994. 226 s. ISBN 80-85863-01-4.

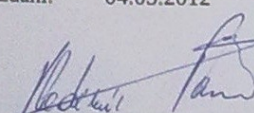
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

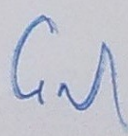
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012




prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Mistopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 3.5.2012

..... Petr Zimák
Jméno Příjmení

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo,
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3),
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO,
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

3.5.2012

Petr Žinčík

Jméno Příjmení

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého bydliště autora práce:

Bc. Petr Žinčík

Haviřov - Podlesí, Dlouhá třída 89.C 736 01

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Janu Látalovi za její vedení, inspiraci a trpělivost. Za cenné rady, diskuze a všestrannou pomoc při jejím vypracování také děkuji profesorovi RNDr. Vladimíru Vašínkovi CSc. a panu Ing. Petru Šiškoví, Ph.D. Za ochotu a pomoc při plnění mých pracovních úkolů děkuji panu Ing. Janu Skapovi, Ph.D, Ing. Andreji Línerovi a Ing. Martinu Pápešovi.

Rovněž patří můj dík přítelkyni za její velkou trpělivost a podporu při studiu.

Anotace diplomové práce

ŽINČÍK, Petr. *Studium vazebních podmínek pro kvazi-jednovidová optická vlákna : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektroniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky, 2012, 57 s. Vedoucí práce: Látal, Jan.

Abstrakt:

Diplomová práce je zaměřena na studium vazebních podmínek pro kvazi-jednovidová optická vlákna vytvořená ve spolupráci katedry telekomunikací VŠB-TU Ostrava s UFE AVČR. Práce je tematicky rozdělena do čtyř částí.

V první části jsou popsány základní typy optických vláken, kvazi-jednovidová vlákna a možnosti vazby světla do optického vlákna. Dále je v této části popsáno svařování a možnosti měření optických vláken, blíže pak měření útlumu a optického svazku.

Druhá část vyhodnocuje výsledky měření útlumu pomocí přímé metody 1C a nepřímé metody OTDR.

Třetí část popisuje sestavení experimentálního pracoviště pro měření vazeb různých typů kvazi-jednovidových vláken. Dále popis reprodukovatelného měření optického svazku metodou slit a pomocí CCD kamery.

Poslední část vyhodnocuje a porovnává výsledky měření optického svazku pomocí přístroje Beam profiler a CCD kamery. Cílem diplomové práce je vybrat z jedenácti kvazi-jednovidových vláken ty, která nejlépe vyhovují pro nasazení vláken do provozu.

Klíčové slova:

Kvazi-jednovidové optické vlákno, útlum, přímá metoda, OTDR, optický svazek, Beam profiler, metoda slit, knife-edge, pin hole, CCD kamera, Gaussovský svazek.

Annotation of Master Thesis

ZINCIK, Petr. *Study of quasi single-mode optical fiber coupling conditions* : Master Thesis. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Telecommunications, 2012, 57 p. Thesis head: Látal, Jan.

Abstract:

This thesis is focused on the study of coupling conditions of quasi single-mode optical fiber made with the Department of Telecommunications Technical University of Ostrava with the Institute of Photonics and Electronics, Academy of Sciences. The work is split into four thematic sections.

The first section describes the basic types of optical fibers, quasi single-mode fiber links and possibilities of light into optical fibers. It is also described in this section welding and measurement capabilities of optical fiber closer to the measurement of attenuation and optical beam.

The second part evaluates the results of measurements of attenuation by the direct method 1c and indirect method OTDR.

The third section describes how to build an experimental workplace for measuring different types of links quasi single-mode optic fibers. Also description of a reproducible method of measuring optical beam through the slit and the CCD camera.

The last section evaluates and compares the results of the measurement apparatus using optical beam Beam profiler and CCD camera. The objective of this thesis is to choose from eleven quasi-single mode optical fibers those which are most adapted for use fiber into operation.

Keywords:

quasi-single mode optical fiber attenuation, the direct method, OTDR, optical beam, beam profiler, a method slit, knife-edge, pin hole, CCD camera, Gaussian beam.

Seznam použitých symbolů a zkratek

E	Vektor elektrického pole
I	Proud
M^2	Faktor kvality optického svazku
P_1	Vstupní výkon
P_2	Výstupní výkon
f	Radiální funkce
k_0	Velikost vlnového vektoru
l	Délka
n_1	Index lomu jádra
n_2	Index lomu pláště
r	Radiální souřadnice
u	Útlum
z	Radiální souřadnice
α	Měrný útlum
β	Fázová konstanta
μ	Permeabilita prostředí
Φ	Obecná složka elektromagnetické vlny
ε	Permittivita prostředí
∇	Vektorový operátor
Δ^2	Laplaceův operátor
BPP	Beam parametr product
CCD	Charge-coupled device
CSF	Compagnie générale de télégraphie Sans Fil
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifiers
MCVD	Modified Chemical Vapour Deposition
MFD	Mode Field Diameter
NA	Numerická apertura
OLTS	Optical Loss Test Set
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
STL	Standard Telecommunication Laboratory
ÚFE AV ČR	Ústavu fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR
WDM	Wavelength Division Multiplexing
C_3H_8O	Isopropylalkohol, Isopropanol, izopropylalkohol, izopropanol, IPA

Obsah

1.	ÚVOD.....	1
2.	JEDNOVIDOVÁ OPTICKÁ VLÁKNA.....	4
3.	MNOHOVIDOVÁ OPTICKÁ VLÁKNA.....	5
4.	KVAZI-JEDNOVIDOVÁ OPTICKÁ VLÁKNA.....	6
5.	VLÁKNOVĚ OPTICKÉ SENZORY ZALOŽENÉ NA REDISTRIBUCI VÝKONU	8
6.	VAZBA SVĚTLA DO OPTICKÉHO VLÁKNA	9
7.	METODY MĚŘENÍ OPTICKÝCH VLÁKEN.....	10
7.1.	MĚŘENÍ ÚTLUMU OPTICKÉHO VLÁKNA	10
7.1.1.	PŘÍMÁ (TRANSMISNÍ) METODA.....	11
7.1.2.	PŘÍMÁ METODA - PŘÍSTROJ OLST	12
7.1.3.	METODA OTDR.....	13
7.2.	MĚŘENÍ OPTICKÉHO SVAZKU	14
7.2.1.	METODA KNIFE-EDGE (HRANA NOŽE).....	15
7.2.2.	METODA SLIT (ŠTĚRBINA).....	15
7.2.3.	METODA PIN-HOLE (DÍRKA)	16
7.2.4.	CCD KAMERY.....	16
8.	SVAŘOVÁNÍ OPTICKÝCH VLÁKEN	16
9.	MĚŘENÍ ÚTLUMU KVAZI-JEDNOVIDOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN.....	18
9.1.	PŘÍMÁ METODA	19
9.2.	METODA OTDR	21
10.	EXPERIMENTÁLNÍ PRACOVNÍŠTĚ PRO NAVAZOVÁNÍ SVĚTLA DO KVAZI-JEDNOVIDOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN.....	23
11.	REPRODUKOVATELNÁ MĚŘENÍ VAZEB PRO RŮZNÉ TYPY KVAZI-JEDNOVIDOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN.....	27
11.1.	BEAM PROFILER - MĚŘENÍ OPTICKÉHO SVAZKU.....	27
11.2.	CCD KAMERA - MĚŘENÍ VIDOVÉHO POLE.....	36
12.	ZÁVĚR.....	52
	LITERATURA	55
	SEZNAM PŘÍLOH	57

1. Úvod

Technologie optických vláken se za posledních 50. let stala každodenní součástí našeho života a těžko bychom si svět bez ní dokázali představit. Naše data se po nich šíří neustále, při výběru peněz z bankomatu nebo na poště, dokonce i při telefonování. Vývoj optických vláken sahá až do 60. let minulého století. Nobelovu cenu za fyziku však dostali vědci, kteří se významně podíleli při vývoji optických vláken, až v roce 2009. Bylo to více než 43 let od publikace Kaova a Hokchamova článku v červenci 1966. Polovinu této ceny získal Charles Kuen Kao a druhou polovinu pak George Smith a Willard Boyle.

Počátky historie optických vláken nacházíme hluboko v 19. století, kdy v roce 1841 Daniel Calladon demonstroval vedení světla v laminárním proud vody vytékajícím z nádrže. Nechal procházet světlo proudem vody, které se odrazilo totálními odrazy na rozhraní voda/vzduch a opouštělo proud vody, jen pokud se laminární proud rozrušil na kapky, nebo když narazil na pevnou překážku. Svou světelnou fontánu podrobně popsal ve francouzském časopise *Comptes Rendus*. Od vedení světla ve vodní fontáně je jen malý krůček ke skleněným světlovodům. V 50. letech bylo poprvé navrženo, že jednotlivá vlákna budou tvořena silným jádrem a tenkým pláštěm z materiálu s nižším indexem lomu. Začátkem 60. let již byly ohebné vláknové optické endoskopy využívány v lékařství a té době se již uvažovalo o nasazení vláknové optiky v telekomunikacích. Světlo totiž nabízelo potenciálně 10 000 x větší přenosovou kapacitu než stávající radioreléové spoje. Jediný problém, který brzdil vědce po celém světě, byl útlum a disperze. Optická skla v té době měla útlum kolem 1000 dB/km. Myšlenkou využít tyto skleněná vlákna pro komunikaci se zabývaly firmy STL v Anglii a CSF ve Francii.

Nejnižší známý útlum v té době měla křemenná skla. Křemenné sklo má vysokou teplotu zpracování oproti jiným sklům, okolo 2000°C. Bohužel se nenašla vhodná pec schopná zahřát křemennou preformu tak, aby bylo možné táhnout vlákno. Používalo se tedy multi komponentní sklo s nižší teplotou tání. První jednovidové optické vlákno bylo na světě v roce 1965. Zbývalo ovšem vyřešit zásadní problém útlumu. Vlákna z CSF měla útlum stovky dB/km, nakonec Charles Kuen Kao po výpočtech došel k závěru, že tyto ztráty jsou dány absorpčními pásy čistého materiálu, Rayleighovým rozptylem a nečistotám ve skle. Pokud by se všechny tyto příčiny odstranily, ztráty by byly jen několik dB/km. Kao a Hockham zaslali podrobnou analýzu vlastností optických vláken do britského časopisu a článek vyšel v červenci 1966. Kromě ztrát skla a fluktuací rozměrů popsali vlastnosti elektromagnetických módů vlákna, ohybové ztráty, disperzi a z ní vyplývající omezení na šířku pásma.

Aby mohl Kao měřit tak malé útlumy, vyvinul nový a velmi citlivý spektrometr. Když v roce 1969 naměřil ztráty syntetického křemenného skla pouhých 5 dB/km, začaly se vážně zabývat vláknovými optickými komunikacemi Bellovy laboratoře a sklárny Corning, které měli od třicátých let technologii výroby čistého syntetického křemene (hydrolýza v plameni). Při této metodě reaguje v plameni kyslíko-vodíkového hořáku voda a plynný chlorid křemičitý za vzniku ultra čistých sazí SiO_2 . V Corningu měli pec, která dokázala zahřát sklo na více než 2000°C a v roce 1970 naměřili na cívce s 200m jednovidového vlákna útlum 16 dB/km na červené vlnové délce. V roce 1971

začali dopovat v Bellových laboratořích jádro místo oxidu titaničitého oxidem germaničitým pro zvýšení indexu lomu jádra. Navrhli modifikovanou metodu nanášení z plynné fáze MCVD, která je jedna z nejvýznamnějších metod přípravy preforem optických vláken dodnes [21].

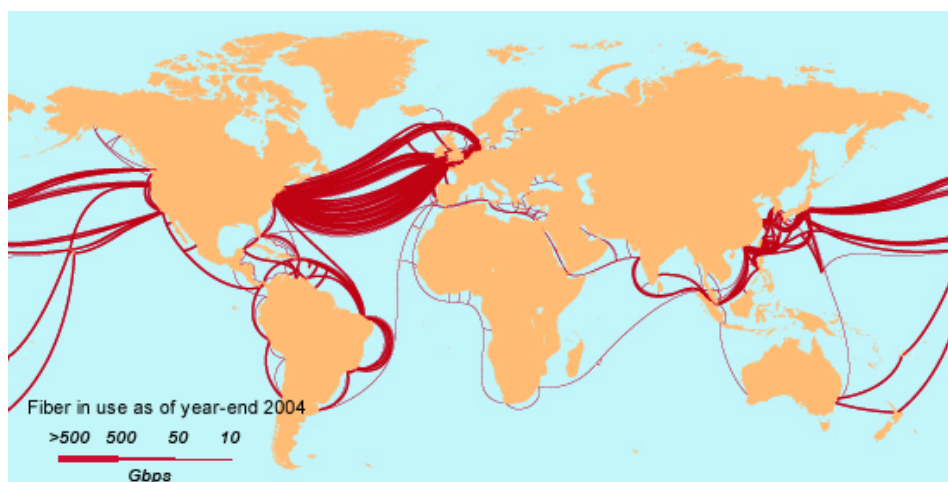
V roce 1975 byla nainstalována první optická přenosová trasa v Dorsetu v Anglii a za rok poté naměřili útlum pouhých 0,47 dB/km na vlnách minimální chromatické disperze v okolí 1,2 - 1,3 μm . Další revoluční událostí bylo objevení vláknových zesilovačů dopovaných erbiem EDFA, pomocí nichž se lépe využívala šířka pásma optických vláken a posílat tak po jednom vlákně několik signálů na různých vlnových délkách, tzv. vlnový multiplex (WDM). V bývalém Československu bylo první optické vlákno připraveno v roce 1980 v Československé akademii věd v laboratoři technologie optických vláken. Tato laboratoř je nyní součástí Ústavu fotoniky a elektroniky (ÚFE) AV ČR. Byla zde vyvinuta zařízení pro výrobu optických vláken, ale také měřicí zařízení.

Optická vlákna fascinujícím způsobem změnila komunikaci. Názornou ukázkou této změny je vývoj transatlantických kabelů (tabulka 1). Zatímco koncem 50. let bylo dosaženo rekordních 36 simultánních hlasových hovorů, v roce 1988 pomocí podmořského kabelu s optickými vlákny již byla přenosová kapacita více než tisícinásobná. V roce 2000 to bylo poprvé, kdy byla k dispozici podstatně větší přenosová kapacita, než byly požadavky telekomunikačních operátorů. [1]

Tab. 1: Vývoj transatlantických kabelů TAT [1]

rok uvedení do provozu	název	šířka pásma, přenosová kapacita	počet hlasových kanálů	použité technologie
1956	TAT-1	150 kHz	36	koaxiální kabel, elektronky, analogový přenos
1959	TAT-2	230 kHz	48	-"
1963	TAT-3	1,1 Mhz	138	-"
1965	TAT-4	1,1 Mhz	138	-"
1970	TAT-5	6 Mhz	845	germaniové tranzistory
1976	TAT-6	30 Mhz	4000	křemíkové tranzistory
1978	TAT-7	30 Mhz	4000	-"
1988	TAT-8	280 Mb/s	40 000	optická vlákna λ 1,3 μm , digitální přenos
1992	TAT-9	560 Mb/s	80 000	optická vlákna λ 1,5 μm , digitální přenos
1992	TAT-10	1,1 Gb/s	120 000	-"
1993	TAT-11	1,1 Gb/s	120 000	-"
1996	TAT-12/13	30 Gb/s	614 000	optické zesilovače EDFA
2000	TAT-14	1,87 Tb/s	> 13 000 000	-"

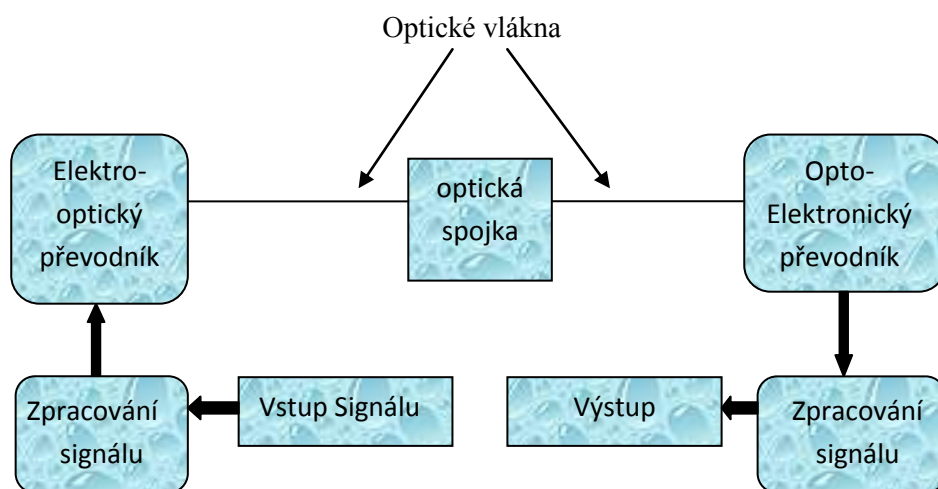
V současné době (2011) drží rekord za nejvyšší přenosovou rychlost společnost NEC, které se podařilo pomocí 370 různých laserů s různými frekvencemi, polaritami, fázemi a amplitudami dosáhnout po jednom optickém vlákně rychlosti 101.7 TB/s na vzdálenost 165 km [2].



Obr. 1: Podmořské kabely (2006) [11]

Ku příkladu při tsunami v Asii 26.12.2004 bylo zničeno 18 podmořských kabelů v okolí Taiwanu. Lodě, které opravovaly podmořské kabely, byly dlouhé 100m a pokud byly povětrnostní podmínky příznivé pracovaly 24hodin denně. Bylo zapotřebí speciálního háku, který poškozený podmořský kabel vytáhl na palubu lodí. Po opravě byl kabel znovu položen na dno a za pomoci dálkově ovládané ponorky (ROV - Remotely Operated Vehicles) zahrabán do písku [11].

Optická vlákna vyrobená z křemičitého skla jsou nejpoužívanější médium pro přenos na velké vzdálenosti. Díky své nízké ztrátovosti a disperzi dosahují přenosových ztrát na vlnové délce 1550 nm pouhých 0,154 dB/km. Intenzita světelného signálu poklesne na polovinu až ve vzdálenosti 20 km. Takové přenosové vlastnosti v dnešní době jiné médium neumožňuje [10]. Použití optického vlákna jako přenosové médium zaručuje dokonalou odolnost proti vlivům elektromagnetického pole a vysokou odolnost proti odposlechu a narušení bezpečnosti. Obrázek č. 2 popisuje přenos signálu od zdroje k přijímači. Elektro-optický převodník se používá k převodu datového signálu na optický signál pro dálkový přenos optickým kabelem, protože signál na vstupu není přizpůsobený pro přenos před optické vlákno. Na konci optického spoje je optický signál převeden opto-elektronickým převodníkem na datový signál a dále zpracován.



Obr. 2: Blokové schéma optické trasy

Výhody technologie

- Odolnost vůči rušivým elektromagnetickým signálům
- Vysoká odolnost vůči odposlechům
- Malé vyzařování optické energie mimo vlnovod
- Nízká hmotnost a rozměry

Nevýhody technologie

- Nelze přenášet energii pro napájení mezilehlých systémů
- Náročnější technologie výroby a spojování
- Náročnější technologie pro nastavování a kontrolu parametrů

2. Jednovidová optická vlákna

Jsou využívána na dálkové přenosy díky vysoké přenosové rychlosti. Použití je nákladnější především kvůli drahým optickým zdrojům. Typickými vlnovými délkami jsou v současnosti 1310nm a 1550nm. Ve vlákne se šíří pouze jeden vid (paprsek) a využívají skokový index lomu. Vyznačují se menším průměrem jádra než vlákna mnohovidová [4]. Díky tomu se velké množství energie šíří pláštěm. Proto se zavedl parametr MFD průměr módového pole. Tento parametr je velmi důležitý pro spojování optických vláken, protože spojí-li se vlákna s různými MFD, naroste tak hodnota útlumu optického spoje.

Jednovidový režim je závislý na vlnové délce, numerické apertuře a hlavně průměrem jádra. Následující relace popisuje jednovidový režim:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA \leq 2.405 \quad (1)$$

Pokud je velikost normalizované frekvence V menší než 2.405, vlákno je v jednovidovém režimu. Pokud je velikost normalizované frekvence větší jak 2.405, funguje vlákno v mnohovidovém režimu.

$$\lambda_c \leq \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{2.405} \quad (2)$$

Průměr módového pole je závislý na vlnové délce. Zavádí se proto parametr mezní vlnová délka (2), díky které můžeme jedno vlákno využít pro jednu vlnovou délku jako jednovidové a pro druhou vlnovou délku jako mnohovidové.

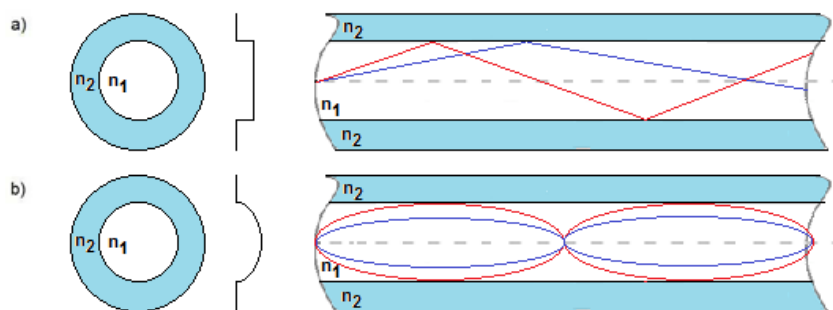
3. Mnohovidová optická vlákna

Ve vlákne se předpokládá současné šíření více vidů. Hlavní faktor, který omezuje přenosové možnosti je vidová disperze, která má za následek rozdílné šíření vidů ve vlákne. Využívají se na kratší vzdálenosti [4]. Typickými vlnovými délkami jsou v současnosti 850nm a 1310nm

Bylo vytvořeno několik druhů vlnovodů s nejrůznějšími přenosovými vlastnostmi. Obecně je můžeme rozdělit na vlákna tvořena jednou či více vrstvami homogenního dielektrika a na vlákna s plynule proměnným indexem lomu.

Prvně zmíněný starší typ se nazývá optický vláknový vlnovod se skokovou změnou indexu lomu a bývá označován SI (step index). Druhý typ vlákna má oblast jádra nehomogenní se závislostí indexu lomu blízkou parabolické. Je označován jako optický vlnovod se spojitě proměnným indexem lomu, též vlnovod gradientní, označen jako GI (gradient index). Jejich profily jsou zobrazeny na obrázku 3 [4].

Oba tyto základní typy vlnovodů se od sebe liší mimo jiné mechanismem šíření energie. U SI vlnovodů se energie šíří pomocí odrazu na rozhraní jádro-plášť, u GI vláken je to pak zakřivená trajektorie optických paprsků. Výroba gradientních vláken je technologicky i finančně náročnější, ale GI vlákna zásadně potlačují vidovou disperzi [4].



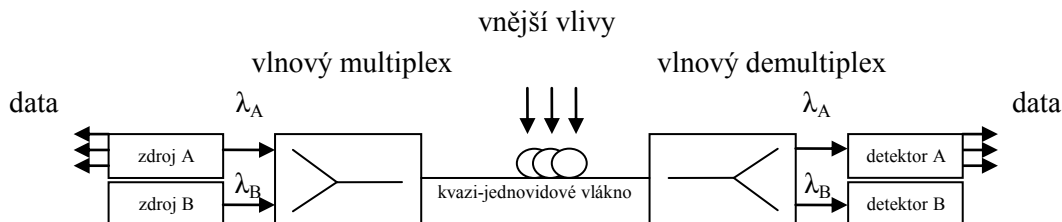
Obr. 3: Profil vláken a) se skokovým indexem lomu b) - s gradientním indexem lomu

4. Kvazi-jednovidová optická vlákna

Kvazi-jednovidová optická vlákna jsou optická vlákna schopná pracovat jako vláknově optický senzor a zároveň jako vysokorychlostní komunikační médium. Vlákna jsou navržena tak, aby přelévala energii mezi několika vidy šířícími se ve vlákně. Těmito unikátními vlastnostmi je dosaženo atypickou profilovou strukturou. Tato vlákna byla ve spolupráci s ÚFE AV ČR vyvinuta s označením SGxxxx. Vlákna použita v této diplomové práci měla tato označení: SG1005, SG1005II, SG1006, SG1017, SG1020, SG1082, SG1087, SG1095, SG1097, SG1097II, SG1142. Označení koncovkou II značí, že se jedná o totožný profil, ze kterého byla vlákna tažena.

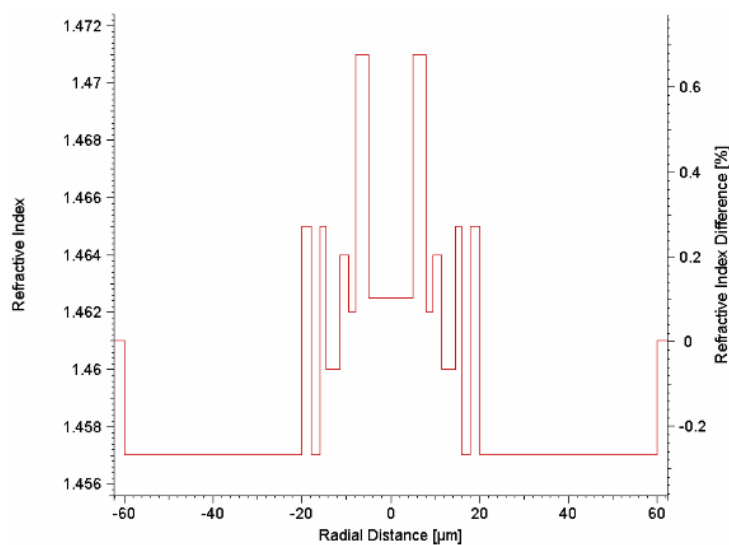
Kvazi-jednovidová vlákna pracují za hranici jednovidovosti, což znamená, že podporují šíření více vidů, typicky 2-6.

Pomocí vlnového multiplexu, by bylo vlákno buzeno dvěma zdroji o různých vlnových délkách. Předpokládá se vlnová délka 1550nm pro telekomunikační účely, na které by vlákno pracovalo v klasickém jednovidovém režimu a vlnová délka 850nm, na které by vlákno pracovalo v režimu kvazi-jednovidovém, čímž by podporovalo šíření několika vidů s významným energetickým příspěvkem, mezi kterými by bylo možné sledovat přerozdělení energie [9,10,20]. Tohle řešení principiálně popisuje následující obrázek.

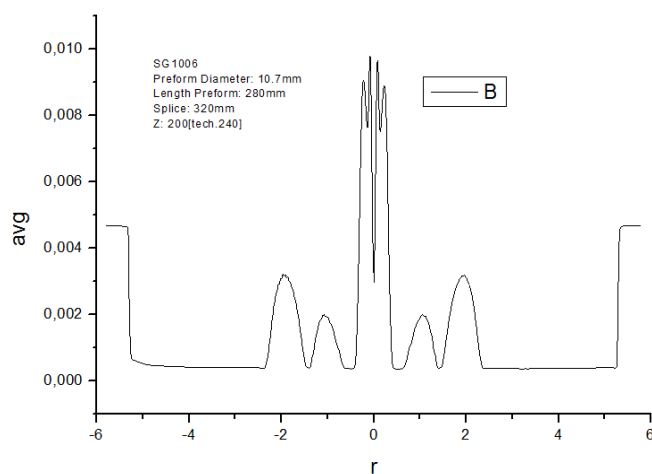


Obr. 4: schéma zapojení s kvazi-jednovidovým vláknem

Navržená vlákna musí mít celkové rozměry stejné jako klasické SM vlákno a co nejbližší velikost MFD. Profil kvazi-jednovidového optického vlákna SG1005 je uveden na obrázku 5. Jedná se o profil vlákna, který má velmi komplikovanou strukturu s různými změnami indexu lomu a potlačeným vláknem. Vlákna jsou testována v rámci výzkumu a závěrem této diplomové práce bude vybrat vlákno, které nejvíce odpovídá požadavkům pro telekomunikační média na vlnové délce 1550nm a pro senzorické požadavky na vlnové délce 850nm.



Obr. 5: Návrh profilu kvazi-jednovidového optického vlákna SG1005 [10]



Obr. 6: Profil preformy pro vlákno SG1006

Na obrázku 6 je zobrazen profil preformy, ze které bylo taženo vlákno typu SG1006. Takto podobný profil má vlákno SG1017. Pan Dr. Ing. Ivan Kašík z UFE AV ČR rozdělil struktury do čtyř skupin :

- mnoho prstenců (SG975, SG1005, SG1082, SG1087, SG1095, SG1097, SG1142)
- jeden prstenec (SG968, SG1006, SG1017)
- dva prstence (SG990)
- velké jádro (SG1020)

5. Vláknové optické senzory založené na redistribuci výkonu

Pátá kapitola popisuje optické snímače, které pro snímání měřené veličiny využívají detekovatelné redistribuce výkonu. Metoda vyšla z myšlenky přenášet po jednom optickém vlákne datovou komunikaci a zároveň provádět kontinuální monitoring telekomunikačních tras a sledování vlivů na přenos dat.

V případě vláknových senzorů, jednovidové vlákno, které by bylo uvedeno do kvazi-jednovidového režimu a umožnilo by šíření více vidů, ztrácí uplatnění v interferometrických a polarizačních senzorech. Na druhou stranu však vlákno s omezeným počtem vidů umožní vyhodnocovat jemné vlivy v optickém vlákne, které vedou k vidové vazbě a diferenciálnímu vidovému útlumu, který lze vyhodnocovat na výstupu. Mimo výše uvedené parametry lze vyhodnocovat také změny v energetické distribuci po průřezu vlákna. Jako vhodný nástroj pro metodu redistribuce výkonu se ukazuje být analýza vázaných výkonů. Tato analýza je vhodná v případě vícevidových vláken, protože umožňuje sledovat střední hodnoty výkonu všech vidů jako celku, na rozdíl od analýzy vázaných vidů, která řeší šíření jednotlivých vidů. Rovnice analýzy vázaných výkonů jsou souborem konečného počtu diferenciálních rovnic prvního řádu se symetrickými konstantními koeficienty. Mají důležité omezení, neboť platí pouze pro relativně slabé vazby. Rovnice pro vázané výkony pak v konečné podobě vypadají následovně [9,10,12]:

$$\frac{dP_\mu}{dz} = -2\alpha_\mu P_\mu + \sum_{v=1}^N h_{\mu v} (P_v - P_\mu), \quad (3)$$

kde vazební koeficienty:

$$h_{\mu v} = \left| \hat{K}_{\mu v} \right|^2 \left\langle \left| F(\beta_\mu - \beta_v) \right|^2 \right\rangle, \quad (4)$$

kde pro vazební koeficienty dále z rovnic vyplývá, že jsou symetrické,

$$h_{\mu v} = h_{v \mu} \quad (5)$$

Koeficient výkonových ztrát $2\alpha_\mu$ představuje ztráty způsobené vyzařováním a také tepelné ztráty. Jestliže předpokládáme, že v jistém bodě z je veškerý výkon nesen pouze videm μ , pak:

$$\frac{dP_\mu}{dz} = - \left(2\alpha_\mu + \sum_{v=1}^N h_{\mu v} \right) P_\mu \quad (6)$$

Ztrátový člen je rozšířen sumou přes všechny vazební koeficienty, z čehož plyne, že vedený vid μ ztrácí výkon do všech dalších vedených vidů. Jestliže naopak předpokládáme, že v jistém bodě z vid μ nese nulový výkon, pak:

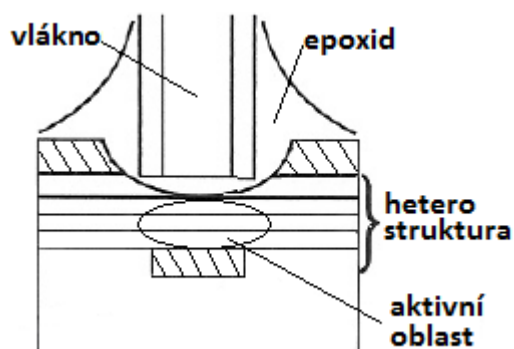
$$\frac{dP_\mu}{dz} = \sum_{v=1}^N h_{\mu v} P_v. \quad (7)$$

Kladná derivace dP_μ / dz zde říká, že vid μ získává výkon vazbou se všemi dalšími vidy [9,10].

6. Vazba světla do optického vlákna

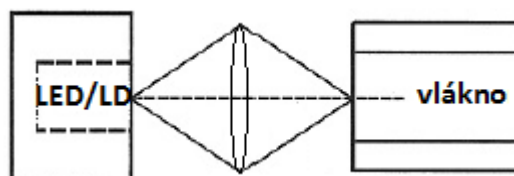
Množství navázaného světla do optického vlákna ovlivňuje přenosové vlastnosti média. Z tohoto důvodu se vyrábějí výkonové LED diody nebo Laser diody, aby se maximalizovala účinnost vazby do vlákna.

- Vlákna v blízkosti přechodu



Obr. 7: Vlákno v blízkosti přechodu

- Použití mikročoček, makročoček



Obr. 8: Využití čoček

- Tvarování konců vláken



Obr. 9: Tvary konců vláken

7. Metody měření optických vláken

Metody měření optických vláken dělíme do několika skupin dle měřeného parametru. Každý parametr má více metod měření. Dále měření rozdělujeme dle použitého optického vlákna.

Mnohovidová

Parametr	metoda měření
Útlum	dvou délek, vložných ztrát, měření zpětného rozptylu
Šířka pásma	impulsní odezva, frekvenční odezva
Numerická apertura	rozložení optického výkonu dalekého pole

Jednovidová

Parametr	metoda měření
Citlivost na mikro ohyby	rozpínajícího se válce, válce pevného průměru
Citlivost na makro ohyby	navíjení na válec
Průměr módového pole	přímé skenování dalekého pole
Chromatická disperze	měření diferenciálního fázového posuvu, interferometrická

7.1. Měření útlumu optického vlákna

Útlum optických vláken má mnoho příčin. Vyjadřuje se zpravidla v decibelech [dB] a můžeme jej definovat vztahem (8).

$$u = \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

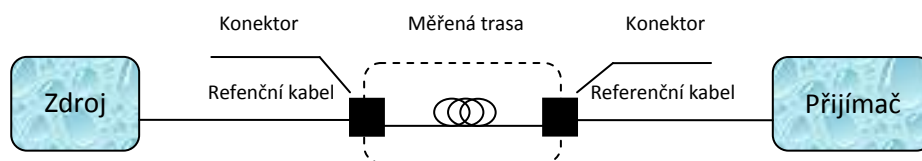
Z praktických důvodů je vhodné definovat měrný útlum, nebo též koeficient útlumu, který se vztahuje na délku jednoho kilometru.

$$\alpha = \frac{u}{l} \quad [\text{dB/km}] \quad (9)$$

Kde l je vzdálenost v km, P_2 je optický výkon na výstupu vlákna, P_1 výkon navázaný do vlákna. Pro měření útlumu se používá několik měřících metod. Před každým měřením by se měly vyčistit veškeré konektory a spojky, které budou na měřené trase, aby se eliminoval nežádoucí vliv nečistot na výsledné hodnoty měření. Doporučuje se po každém čištění kontrolovat kvalitu pomocí inspekčního mikroskopu.

7.1.1. Přímá (Transmisní) metoda

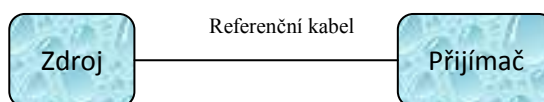
Toto měření se provádí pomocí zdroje optického signálu a detektoru záření. Zdroj vysílá optický signál do vlákna na určitých vlnových délkách, které se přednastaví. Měření se provádí na vláknech, na nichž neběží provoz a slouží ke kontrole zda-li není vlákno prasklé, nebo zda-li se na trase vyskytují ohyby. Měří se převážně celkový útlum vlákna a dá se použít jak na jednovidové, tak i mnohovidové vlákno. Nevýhodou měření je fakt, že se musí opakovat z obou stran vlákna. Využívá se dvou nebo tří referenčních vláken pro kalibraci přístrojů [8].



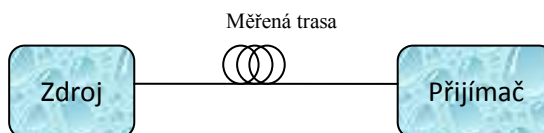
Obr. 10: Schéma měřicí přímou metodou

Pro měření útlumu pomocí přímé metody se využívá tři metod, které se liší pouze počtem použitých referenčních vláken.

Metoda 1a se používá při měření optické trasy patchpanel - patchpanel. Pro kalibraci měřících přístrojů se využívá jedno referenční vlákno, které se pak odpojí viz. obrázek 11 a 12.

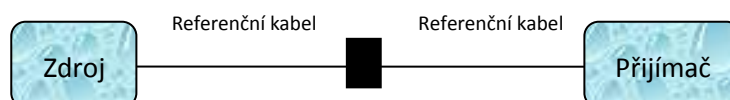


Obr. 11: Kalibrace měřících přístrojů (metoda 1a)

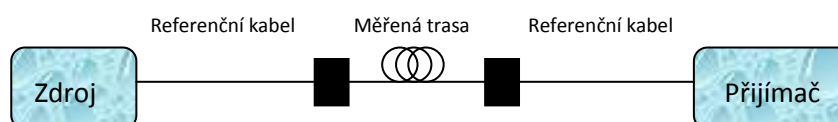


Obr. 12: Měření optické trasy přímou metodou 1a

Metoda 1b se nedoporučuje pro měření, protože využívá pro kalibraci přístrojů dvě referenční vlákna, která se po kalibraci rozpojí a mezi ně vloží měřená trasa. Mezi oběma referenčními vlákny se pak nachází dva konektory, kdy jeden z nich ovlivňuje měření svým útlumem.

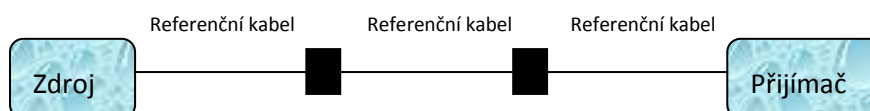


Obr. 13: Kalibrace měřících přístrojů (metoda 1b)

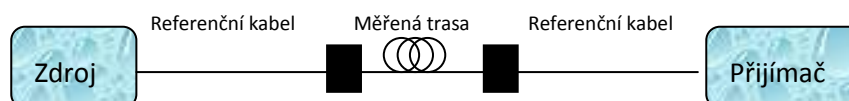


Obr. 14: Měření optické trasy přímou metodou 1b

Metoda 1c se používá při měření optické trasy patchcord - patchcord. Využívá tři referenčních vláken. Jakmile jsou přístroje kalibrovány, odpojí se prostřední a místo něj se vloží měřená trasa.



Obr. 15: Kalibrace měřících přístrojů (metoda 1c)



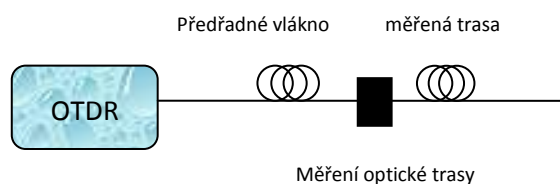
Obr. 16: Měření optické trasy přímou metodou 1c

7.1.2. Přímá metoda - přístroj OLST

Tato metoda se od přímé metody transmisní moc neliší. Rozdíl je v použitých měřících přístrojích. Každý měřicí přístroj obsahuje jak zdroj, tak i přijímač. Metodu lze využít v praxi, odpadá tak zdoluhavé přepojování měřících přístrojů z obou konců měřené trasy. Pomocí této metody jsme schopni změřit vložný útlum vlákna i útlum odrazu [8,13].

7.1.3. Metoda OTDR

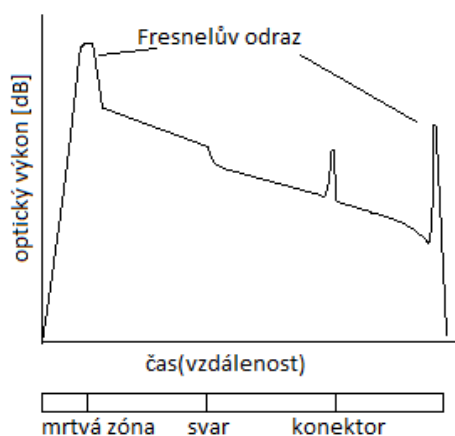
Metoda též zvaná "metoda optické reflektometrie v časové oblasti". Využívá skutečnosti, že energie navázaná do optického vlnovodu se rozptyluje (Rayleigh rozptyl) a část této rozptýlené energie se vrací na vstup, kde může být detekována. Zaznamenaná-li časovou závislost této zpětné rozptýlené energie, získáme informaci o útlumu vlákna, poloze konektorů, svárů, neregularit vlnovodu apod. Touto metodou se dá měřit celá řada parametrů optických vláken. Na obrázku 17 je schéma zapojení OTDR metru [8,13].



Obr. 17: Schéma měřicí metodou OTDR

Výhodou této měřicí metody je její široké uplatnění jak v laboratorních, tak i v polních podmínkách. Dále její pohotovost, tzn. schopnost měření pouze z jednoho konce optického vlákna v kabelu, názorné zobrazení kvality celého měřeného úseku optické trasy, automatické zobrazení útlumů a měrných útlumů optických vláken jednotlivých výrobních délek i celého úseku, útlum jednotlivých spojení (spojek, svárů), umožňuje měřit útlum odrazu konektorů na optické trase, atd.[3,8,13]

Nevýhodou je mrtvá zóna, kterou však lze u moderních reflektometrů eliminovat pomocí předřadného optického vlákna s délkou až několik km. Výsledky měření nejsou dobře reprodukovatelné, protože výslednou hodnotu celkového útlumu optického vlákna ovlivňuje celá řada faktorů. Proto při předávání optické trasy pozorovateli jsou součástí příslušné technické dokumentace nejen průběhy útlumu z reflektometru OTDR, ale i střední hodnoty útlumu analyzované trasy změřených oběma směry přímou metodou (metoda vložných ztrát) [3,8,13].

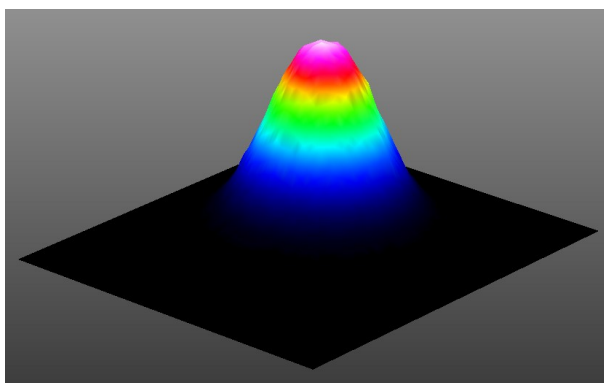


Obr. 18: Výstup OTDR-metru [13]

7.2. Měření optického svazku

Kvalita svazku určuje, jak přesně může být svazek zaostřen za určitých podmínek. Kvalitu svazku lze popsat:

- BPP (souhrnný parametr svazku) - Součin rádiusu a polovičního divergenčního úhlu svazku. Čím větší je tento parametr, tím je kvalita svazku menší.
- M^2 (faktor kvality) - Ideální tvar laserového paprsku je zobrazen na obrázku 19. Faktor kvality udává odchylku reálného svazku od teoretického (Gaussova) svazku.



Obr. 19: Ideální tvar Gaussova svazku (nejnižší hodnota BPP)

Beam radius (poloměr svazku) - Vzdálenost od osy svazku, kde výkon poklesne pod $1/e^2$ (13,5%) celkového výkonu svazku.

Beam divergence - Úhel, který udává, jak rychle se svazek rozšiřuje z pásu svazku.

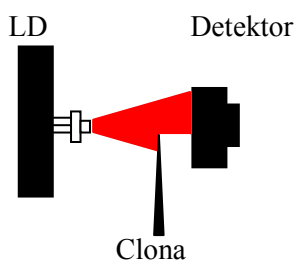
Existuje celá řada metod měření optického svazku a dělí se do několika skupin [17,18].

- Mechanicko-elektrické: Metoda knife-edge, metody scanning pinhole a scanning slit, beamMaster knife edge
- CCD kamery: Dražší metody, výhodou je rychlost měření a také měření libovolného tvaru
- Neelektrické: Odrazem od plochy, Vypálením do papíru, Fluorescenční desky, Vypálení profilu do akrylové kostky

7.2.1. Metoda knife-edge (hrana nože)

Nejstarší mechanicko-elektrická metoda měření. Princip spočívá v postupném zakrývání či odkrývání laserového paprsku a následného zjištění výkonu zbylé části svazku až do úplného odkrytí či zakrytí. Pomocí difference mezi jednotlivými hodnotami se pak vypočítává optický výkon v jednotlivých bodech svazku. Toto měření se většinou provádí ve dvou kolmých osách, pro získání prostorového náhledu na tvar profilu. Čím více os proměříme, tím přesnější tvar profilu získáme.

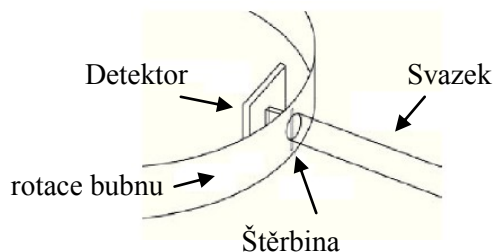
Metoda předpokládá ideální Gaussovský tvar a problém nastává v případě použití laseru s více špičkami, protože se pak špatně dopočítává zbylý výkon v jednotlivých bodech svazku.



Obr. 20: Princip metody knife-edge

7.2.2. Metoda slit (Štěrbina)

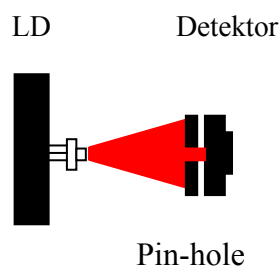
Při této metodě se postupně prochází vyzářený svazek a odečítá se optický výkon, který prošel skrz štěrbinu. K dispozici jsou dvě kolmé štěrbinu na rotujícím bubnu. Měřič výkonu se nachází uvnitř bubnu a snímá profil svazku v obou osách během jedné rotace. Maximální frekvence rotace bubnu je 25 otáček za sekundu a průměr štěrbinu okolo 2-5 μm .



Obr. 21: Princip metody slit

7.2.3. Metoda pin-hole (díрка)

Snímá svazek s kruhovou úpravou. Tato metoda je mnohem pomalejší než výše zmíněné metody, ale umožňuje skenovat libovolný profil svazku v závislosti na velikosti apertury a rozlišení fáze (stupně) přeměny svazku.



Obr. 22: Princip metody pin-hole

7.2.4. CCD kamery

Musí být připojeny k PC, kde vyžadují v zásadě dva speciální programy. První pro zachycení snímku z kamery a uložení do formátu pro další zpracování. Druhý pro převedení snímku na číselné hodnoty představující optický výkon v jednotlivých bodech.

parametry

- Rozlišení - Pro relativně kvalitní zachycení svazku stačí rozlišení 100x100pix, což teoreticky představuje 10 000hodnot výkonu. Většina kamer dovoluje rozlišení větší než 100x100pix. Firma Arsenal udává ve svých přístrojích velikost 1 pixel = 2,2 μm x 2,2 μm a rozlišení 1360x1024pix.
- Rozsah vlnových délek - Schopnost kamery detekovat určité vlnové délky.
- Výkonový rozsah - Jak silný laser může do kamery svítit, aby nedošlo k poškození čipu.
- napájení, provozní teplota a vlhkost, poměr signál/šum, expoziční čas, vyvážení bílé...atd.

8. Svařování optických vláken

Optická vlákna jsou vyráběná v řádech kilometrů a na delší vzdálenosti je nutno jednotlivá vlákna spojovat, lepit či svařovat. Spojování optických vláken se provádí pomocí konektorů a svaření pomocí speciální svářečky, což je také nejpoužívanější metoda spojování vláken. Pokud není

možné použití svářečky či konektorů, další možnost jak spojovat vlákna je lepení pomocí dvousložkového epoxidového lepidla v tzv. V drážce (kapilární spojka).

pomůcky:

- svářečka optických vláken
- zalamovačka optických vláken
- stahovací kleště
- sadu bezchloupkových kapesníků
- láhev s isopropylalkoholem
- ochrana sváru

Před začátkem svařování optických vláken je důležité oba konce nejdříve řádně zbavit všech ochranných pomůcek stahovacími kleštěmi a stahovačkami tak, aby zůstalo pouze obnažené vlákno o potřebné délce. Dále je nutné vlákno vyčistit od nečistot čistícími kapesníky namočenými do isopropylalkoholu a na konci zkrátit zalamovačkou optických vláken.

Poté je možné na jeden konec nasunout ochranu sváru a oba konce vložit do drážek svářečky. Pokud jsou konce nesprávně zařezány nebo jsou od sebe ve svářečce příliš daleko či blízko, svářečka to automaticky rozpozná a zobrazí chybovou hlášku. Po nalezení vhodné polohy svářečka přiblíží oba konce vláken k sobě na nastavenou vzdálenost a svaří je k sobě elektrickým výbojem. Pak provede odhad útlumu sváru a test tahem. Nakonec se vlákna vytáhnou z drážek, přetáhne se přes svár ochrana sváru a vše se zapeče v peci. Pro odhad útlumu se používají tři metody (LID, PAS, RTC) [4].

Atypická optická vlákna je možné svařovat pomocí speciální svářečky. Výše uvedená kvazijednovodová optická vlákna jsou atypická svou profilovou strukturou, rozměry nemají stejné jako konvenční vlákna (9/125). Pokud tedy nepoužijeme přístroj k tomu určený, svár nebude kvalitně provedený. Svářečka Fujikura FSM-45PM, která byla použita při svařování vláken popsaných v této diplomové práci, snímá konce vláken CCD kamerou k vyhodnocení vzájemné polohy obou konců. Navíc tento typ svářečky je schopný vlákna otáčet podél jeho vlastní osy za účelem co nejmenšího útlumu sváru.

Svářečka Fujikura FSM-45PM se ovládá miniaturní klávesnicí, která obsahuje tlačítka Menu, Exit, Enter a čtyři kurzory. V menu nalezneme celou škálu možností nastavení, například vzdálenost konců vláken (GAP), úroveň síly svářecího výboje (Arc Power), čas svařování (Arc Time) a jiné. Je možné si vytvořit profil, který obsahuje určité nastavení a kdykoliv jej při začátku svařování znova načíst a vyhnout se tak opětovnému nastavování různých parametrů.

9. Měření útlumu kvazi-jednovidových optických vláken

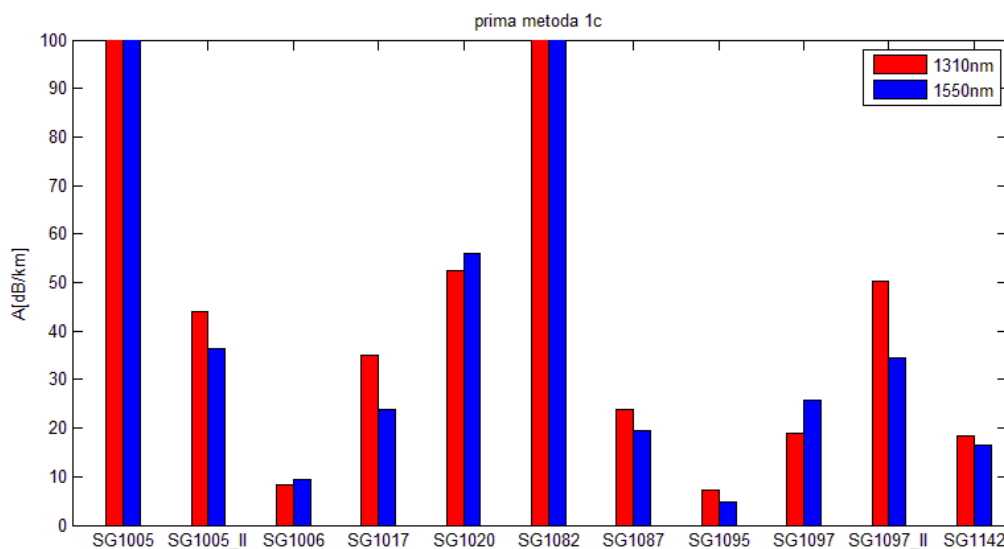
K dispozici bylo 11 vláken o délce od 50m do 1,5km vyrobených ÚFE AVČR. Délka byla později změřena metodou OTDR. Před začátkem měření bylo nutné prvně na všechna vlákna navařit pigtaily (G.652D), na kterých byly konektory typu SC, protože měřicí přístroje OLTS EXFO a OTDR vyžadují tento typ konektoru. Svařování optických vláken popisuje kapitola 8. Prvním úkolem bylo změřit útlum všech vláken pomocí přímé metody a poté pomocí metody OTDR.

použité přístroje

- OLTS EXFO AXS - 200 SN: 434940 inv. č. 50000022649
- OLTS EXFO AXS - 200 SN: 447758 inv. č. 50000022651
- Svářečka optických vláken Fujikura FSM-45PM Patent No: 4878933,4900114*
- OTDR přístroj EXFO QST364D P/N: GP-402 S/N: 420914
- Předřadné vlákno Fibre optic cable P/N 1-041-041-010-110-111-010-500 500m
- kvazi-jednovidova optická vlákna SG1005 - SG1142
- pigtaily (G.652D, SC)
- Zalamovačka optických vláken FIBER CLEAVER FC-6S-C 32084
- Inspekční mikroskop 314 00 140
- Stahovací kleště MILLER a nůž Abisolier-Technik, Sada čistících kapesníků, isopropylalkohol, čistící tyčinky, ochrana svarů

9.1. Přímá metoda

Za pomoci dvou OLST EXFO AXS - 200 byla vlákna měřena pomocí metody 1C. Jeden EXFO byl použit jako optický vysílač (laser source) a druhý jako optický přijímač (power meter). Na optickém vysílači stačilo nastavit "Light source" což znamená zapnutí přístroje jako optický vysílač. Poté byl nastaven "mode" na "autoswitch", aby se jednotlivé vlnové délky dalo změřit jedním měřením, bez nutnosti opakovat celé měření na jiné vlnové délce. Nastavení "autoswitch" přepíná automaticky mezi vlnovými délkami 1310nm a 1550nm v intervalu 1s. Druhý přístroj byl nastaven jako optický přijímač režimem "Power meter" a pomocí průvodce "Loss certification wizard" byly nastaveny parametry měřené trasy. Pokud neznáme žádné parametry měřené trasy, nastavíme "Treshold type" na "Plug & play". Nakonec stačilo pouze zadat standard měřené metody "start refer". Na výběr máme ze čtyř možností a to Non-standard reference, One-jumper reference, Two-jumper reference a Three-jumper reference. Pro lepší pochopení jsou k příslušným standardům zobrazeny i obrázky. Stačí nastavit metodu 1C, "Three-jumper reference", pokračovat "Next" a pomocí "Take reference" nastavit referenci "Set reference". Poté pokračovat v měření podle metody 1C, která se popisuje v kapitole 7.1.1. Měření útlumu se musí opakovat i v druhém směru pro všechna vlákna.

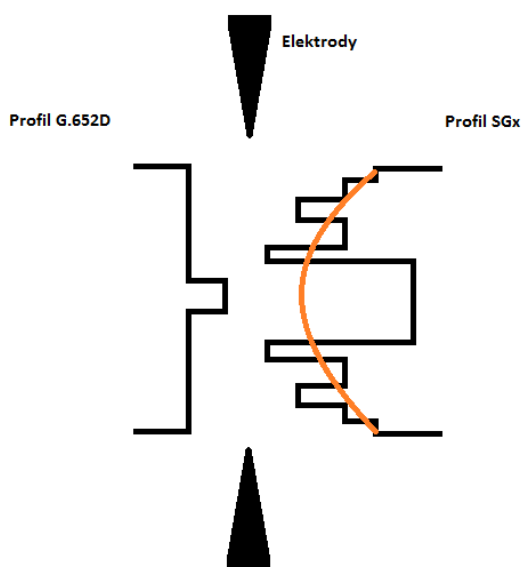


Obr. 23: Naměřené hodnoty útlumů všech špilek přímou metodou 1C

Na obrázku 23 je graf z naměřených hodnot metodou 1C pro obě vlnové délky. Na vodorovné ose jsou jednotlivá měřená vlákna a na horizontální ose je měrný útlum v decibelech na kilometr, který byl později dopočten pomocí vzorců [9,8]. Jednotlivé hodnoty útlumu jsou průměrné hodnoty z obou směrů měření. Z grafu je vidět, že relativně nejnižšího útlumu dosahuje vlákno SG1095 s hodnotou měrného útlumu 7,29 dB/km pro 1310nm a 4,84 dB/km pro 1550nm. Dále vlákno SG1006 s hodnotou měrného útlumu 8,28 dB/km pro 1310nm a 9,38 dB/km pro 1550nm. Další vlákna dosahují hodnot měrného útlumu od 18 dB/km do 52 dB/km pro obě vlnové délky. Vlákno SG1005 dosahuje měrného útlumu 253,27 dB/km pro 1310nm a 202 dB/km pro

1550nm. Vláknem SG1082 s měrným útlumem 182,08 dB/km pro 1310nm a 197,79 dB/km pro 1550nm.

Každé vlákno má jiný atypický profil a při svařování došlo k poškození této atypické struktury. Vláknem dodána z UFE AVČR, byla namotaná na špulky bez jakéhokoliv konektoru. Prvním úkolem bylo na tyto vlákna připevnit konektory, aby bylo možné s vlákny pracovat. Nejvhodnější metoda, která dosahuje nejmenších útlumů je svařování. Na obrázku 24 je zobrazeno svařování pigtailu a atypického vlákna. Oranžovou barvou je naznačeno zničení atypické profilové struktury při výboji. Touto metodou spojení vláken se výrazně zvětší útlum spoje v závislosti na složitosti profilové struktury vlákna.



Obr. 24: Naznačení zničení struktury svárem

Použitá referenční vlákna (pigtaily) o rozměrech 9/125 byla spojována s vlákny X/125, kde $X > 9$. Použitá metoda 1C byla nevhodně zvolená z důvodu využití dvou konektorů. Přes první konektor putuje signál z vlákna s menším průměrem jádra do vlákna s větším průměrem vlákna, tady by se útlum spoje moc neměl projevit. Přes druhý konektor již putuje signál z vlákna s větším průměrem vlákna do vlákna s menším průměrem jádra a část signálu se nenaváže. Toto se projeví zvýšením útlumu spoje, protože spojujeme vlákna s rozdílnými hodnotami MFD. Z důvodů spojování vláken s rozdílnou hodnotou MFD, dosahují vlákna SG1005 a SG1082 hodnot měrného útlumu nad 180 dB/km.

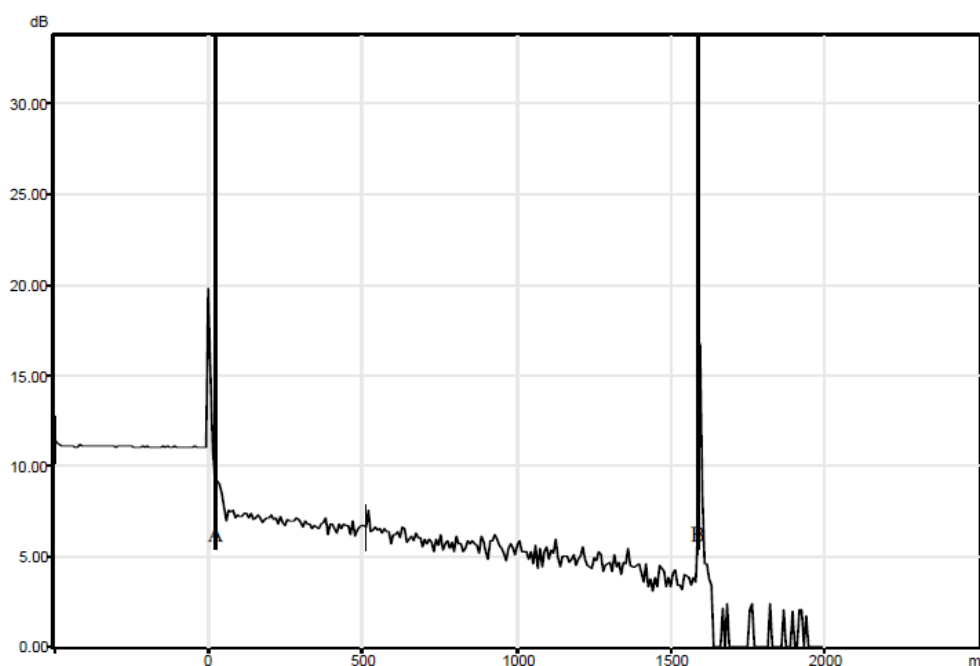
9.2. metoda OTDR

Po zapojení dle schématu zobrazeném na obrázku 17, se OTDR přístroji EXFO QST364D nastavil rozsah na 2.5 km, čas na 45 s, puls na 0.5m, zaškrtnuto bylo nastavení pro všechny vlnové délky a SM režim. Předřadné vlákno mělo cca 500m o rozměrech 9/125 a bylo velmi důležité jej zapojit, aby se eliminovala mrtvá zóna. Měření se provádělo z obou stran vlákna pro tři hodnoty pulsu (0.5m, 1m, 3m).



Obr. 25: Příklad nastavení OTDR metru

Je nesmysl zde udávat všechny výsledky z reflektometrie, uvedu zde pouze jedno vlákno, které touto metodou vyšlo s nejmenší hodnotou měrného útlumu.

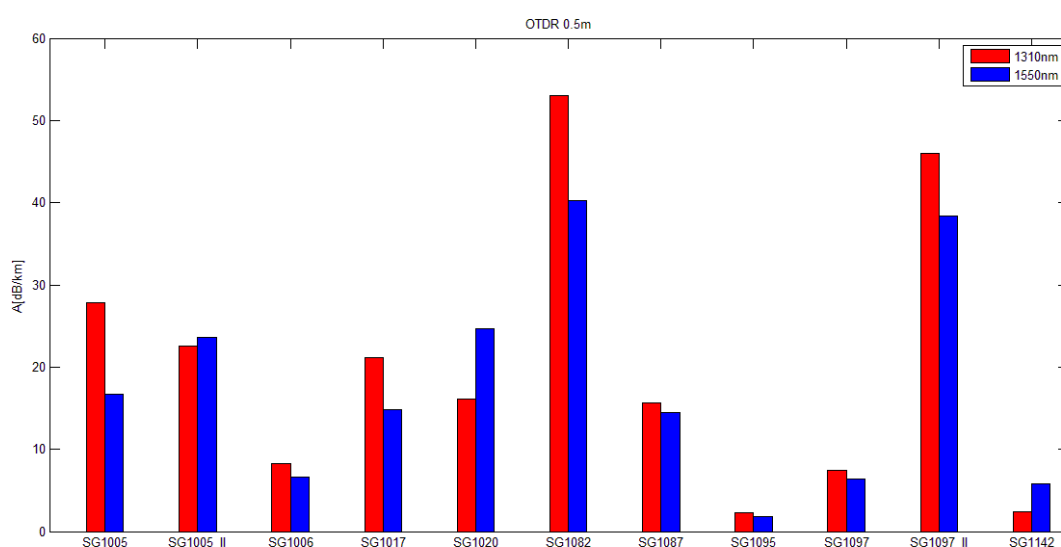


Obr. 26: Graf vlákna SG1095 z metody měření OTDR - 1550nm

Na obrázku 26 je zobrazen výstup z OTDR metru pro vlákno SG1095. Měření proběhlo na délce pulsu 0,5m, z konektoru A do konektoru B (dále pouze AB nebo BA), čas měření byl 45s, a

rozsah na 2,5km. Dále byl začátek trasy nastaven na 0,5km, což je mimo jiné délka předřadného vlákna. Na ose x je délka v metrech a na ose y je útlum v dB. Lze odečíst, že délka měřeného atypického vlákna SG1095 je přibližně 1500m.

V uloženém protokolu o měření, který je ve formátu pdf, lze vyčíst skutečnou délku vlákna (1,5801 km). Dvou bodový útlum mezi nastavenými marky A a B, které značily počátek a konec měřeného vlákna, dosahoval 3,166 dB. Dvou bodový měrný útlum úseku je 1,988 dB/km. Celkově se vlákna měřila pro tři hodnoty pulsu pro obě vlnové délky a to vše z obou stran trasy. Toto vlákno dosahuje nejlepšího útlumu ze všech měřených vláken. Všechny ostatní výsledky jsou uloženy na DVD jako příloha.



Obr. 27: Naměřené hodnoty útlumů všech šparek metodou OTDR

Na obrázku 27 je zobrazen graf naměřených hodnot všech vláken metodou OTDR. Není to standardní výstup pro reflektometrii a byl vytvořen z důvodu porovnání výsledku s předešlou metodou měření útlumu, přímou metodou 1C. Na ose X jsou jednotlivá měřená atypická vlákna a na ose Y je měrný útlum [dB/km]. V grafu jsou výsledky ze směru měření AB o délku pulsu 0,5 m.

Celkově nejmenší hodnotu měrného útlumu dosahuje vlákno SG1095. Dále vlákna SG1006, SG1097 I a SG1142. Nejhorší dopadly vlákna SG1082 a SG 1097 II.

10. Experimentální pracoviště pro navazování světla do kvazi-jednovidových optických vláken

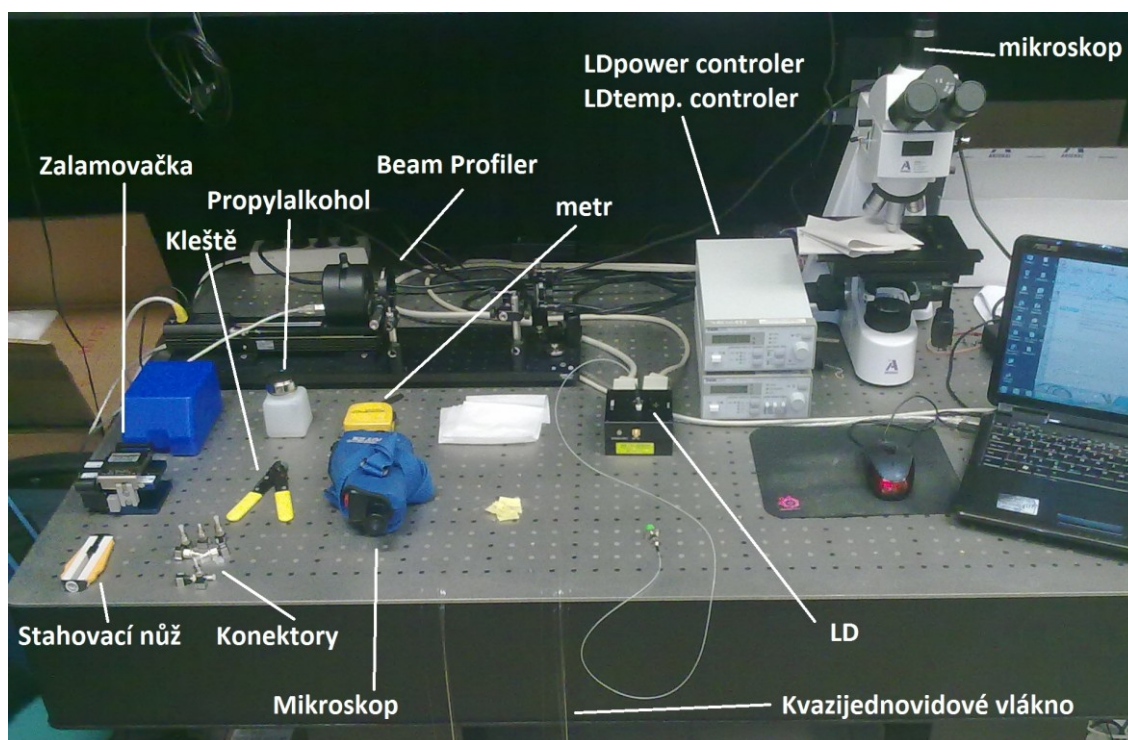
Experimentální pracoviště pro navazování světla do kvazi-jednovidových vláken se sestavilo na katedře telekomunikací v místnosti KrPol108b. Experimentální pracoviště plnilo funkci jako sestava pro měření optického svazku a sestava pro měření vidového pole.

- Sestava pro měření optického svazku využívá přístroje beam profiler a je určena k reprodukovatelnému měření vazeb kvazi-jednovidových optických vláken.
- Sestava pro měření vidového pole obsahuje mikroskop s CCD kamerou, která slouží pro zobrazení rozložení energie mezi jednotlivými vidy šířícími se vláknem.

Pracoviště je zobrazeno na obrázku 28 s popisem nejdůležitějších částí. Použité přístroje jsou uvedeny níže.

použité přístroje

- | | |
|---------------------------------|---|
| • Mikroskop | Arsenal LPT 3113i-T |
| • Beam Profiler | ThorLabs BP109-IR |
| • Laser Diode Controler | ThorLabs LDC 202 C M00222449 |
| • Temperature Conroler | ThorLabs TED 200 C M00223266 |
| • Laser Diode | LD-850-5A SN A1663 |
| • Notebook | Asus 2.2Ghz, 4GB Ram, 500GB HDD, GT220M |
| • Software | ThorLabs Beam 4.0, TsView, Analyza.exe |
| • Power meter | ThorLabs PM30 M00231171 |
| • Rychlokonektory a spojka | FC, ST, FC/FC |
| • Kvazi-jednovidová vlákna | SG1005 - SG1142 |
| • Zalamovačka | Fiber Cleaver FC-6S |
| • Stahovací kleště Miller a nůž | Abisolier-Technik, sada čistících kapesníků, isopropylalkohol, čistící tyčinky, metr, inspekční mikroskop |



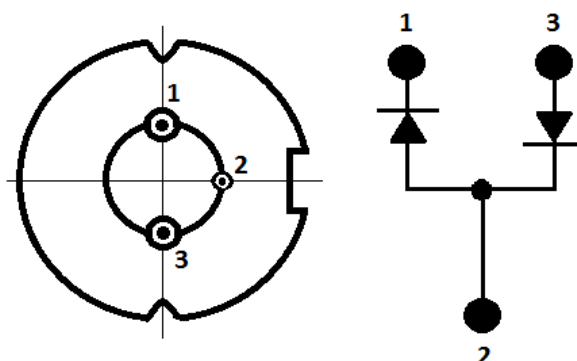
Obr. 28: Experimentální pracoviště pro navazování světla do kvazi-jednovodových optických vláken

Parametry použité laserové diody jsou uvedeny v tabulce č. 2. Součástí diody je vlákno, které je již od výrobce v blízkosti přechodu a zalité epoxidem. Na konci vlákna je konektor typu FC.

Tab. 2: Parametry laserové diody LD-850-5A

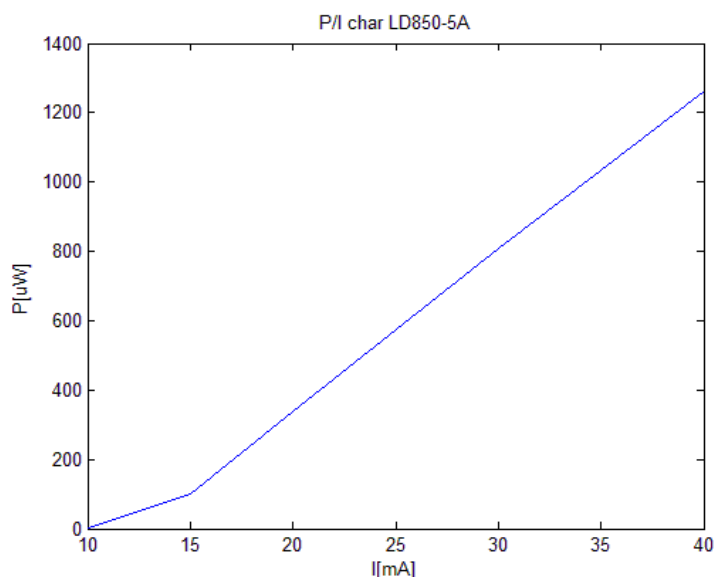
Parametr	Symbol	Min	Typ	Max	Jednotka	Zkušební podmínky
Optický výkon	P_o			5	mW	
Závěrné napětí PD	V_{rd}			30	V	$P_o=5\text{mW}$
Závěrné napětí LD	V_{rl}			2	V	$P_o=5\text{mW}$
Operační teplota	T_o	-10		60	°C	
Skladovací teplota	T_{stg}	-40		85	°C	
Vlnová délka	λ_p	830	850	870	nm	$P_o=5\text{mW}$
Prahový proud	I_{th}		25	40	mA	$P_o=5\text{mW}$
Operační proud	I_{op}		35	50	mA	$P_o=5\text{mW}$
Beam Divergence	Θ_p	8	10	12	°	$P_o=5\text{mW}$ paralelní
Beam Divergence	Θ_{\square}	25	31	40	°	$P_o=5\text{mW}$ kolmý

Další důležitou částí měření bylo správné zapojení laserové diody. Špatné zapojení laserové diody by došlo k jejímu zničení a znemožnění dokončení diplomové práce. Jedná se totiž o jedinou laserovou diodu tohoto typu na katedře a objednávka nové by trvala měsíc, ne-li víc.



Obr. 29: Nastavení pinů diody - pohled zdola (1- LD cathode 2- LD anode, PD cathode, 3- PD anode)

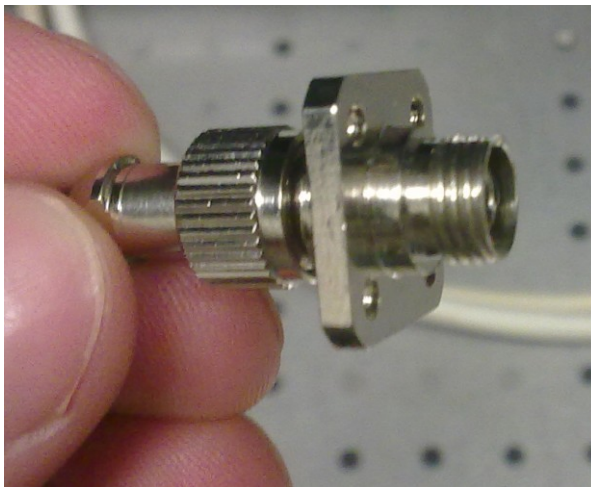
Na obrázku 29 je nakreslena konfigurace pinů diody, která je důležitá pro správné zapojení diody do vlastního teplotního regulátoru TCLDM9, který je propojený s kontrolérem. Kontrolér obsahuje regulátor teploty a regulátor laserové diody. Operační teplota diody je v mezích od -10°C do $+60^{\circ}\text{C}$, teplotní regulátor byl tedy nastaven na 25°C . Proud byl zvyšován od 0mA do 40mA. Dioda již byla několikrát používána v rámci jiných prací, proto optický výkon nedosahoval hodnoty 5mW. Výkon diody byl změřen měřičem výkonu a výsledek je zobrazen v následujícím grafu, kde je zobrazen aritmetický průměr pěti naměřených hodnot od 10mA do 40mA. Hodnoty 0-10mA nemělo smysl zobrazovat, protože výkon diody dosahoval 0W.



Obr. 30: P/I charakteristika použité laserové diody

Operační proud dle tabulky 2 dosahuje hodnoty 35mA a hodnota výkonu při tomto budícím proudu dosahuje průměrně 1,033 mW. Hodnota, při které ještě nedojde k poničení diody, dle katalogu je 50mA. Aby se laserová dioda nezničila, nastavený budící proud nepřevýšil hodnotu 40mA. Při tomto budícím proudu dosahoval výkon na konci vlákna laserové diody v průměru 1,263mW. Dioda tedy byla značně degradována, ovšem pro reprodukovatelnost měření je závislé větší mírou na stabilitě zdroje záření než na velikosti výkonu.

Na propojení vlákna laserové diody a měřeného vlákna byla použita spojka FC/FC, zobrazena na obrázku 31.



Obr. 31: Spojka typu FC/FC na optické vlákno laserové diody

Jednotlivé špulky kvazi-jednovírových vláken měly odlišné délky (od 50m do 1,5km). Vlákná byla zkracována na délku 2m, aby se maximálně eliminovalo šíření plášťových vidů. Tyto 2m dlouhé vlákna byla popisována značkou, aby se rozlišil typ atypického vlákna. Nakonec byl instalován rozebíratelný konektory typu FC, aby se dalo vlákno spojit s vláknem laserové diody.



Obr. 32: rozebíratelné konektory typu FC

Z vlákná se musí prvně odstranit ochrana a dokonale se vyčistit kapesníkem namočeným v isopropanolu. Pak se musí konec zastříhnout zalamovačkou optických vláken a poté stačí nasunout vlákno do konektoru tak, aby konec vlákna netrčel z ferule nebo nebyl příliš schovaný. Nakonec se konektor důkladně očistí a znovu zkontroluje, zdali je konektor opravdu čistý a připravený k měření. Pokud ne, celý proces čištění se opakuje.

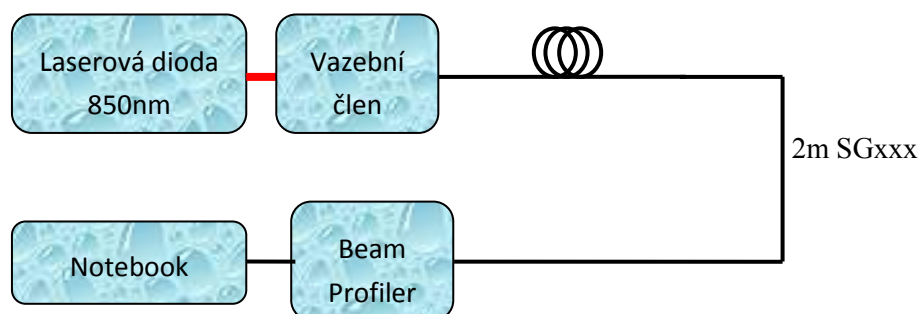
Takto osazené vlákno montážními konektory typu FC je připraveno k měření na přístroji Beam profiler.

11. Reprokovatelná měření vazeb pro různé typy kvazi-jednovidových optických vláken

Přesnost a reprokovatelnost měření útlumu jednovidových vláken je závislá na stabilitě a spektrálních vlastnostech zdroje záření a na kvalitě a linearitě detektoru a detekční elektroniky.

11.1. Beam profiler - měření optického svazku

Blokové schéma je uvedeno na obrázku 33. Červenou barvou je označeno vlákno laserové diody, které musí být spojkou FC/FC spojeno s měřeným vzorkem.



Obr. 33: Blokové schéma sestavy pro měření optického svazku

Druhý konec měřeného vzorku se nasune do Beam profileru a není důležité, jaký typ konektoru musí na tomto konci vlákna být. Důležité je, aby vlákno nezasahovalo do rotujícího bubnu přístroje, nebo nebylo příliš daleko.

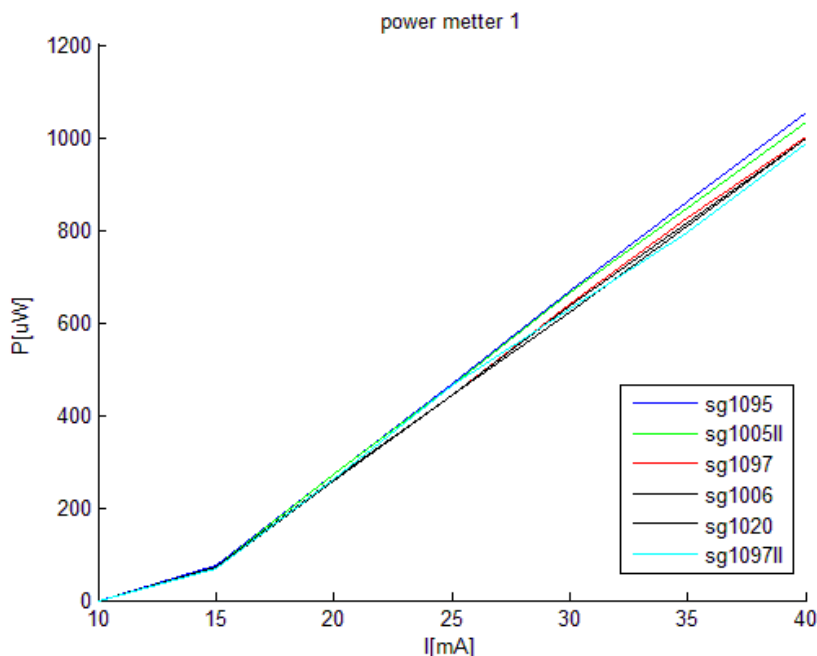


Obr. 34: Konec vlákna přichycený u přístroje Beam profiler. Přístroj beam profiler je určen k měření profilu optického svazku a propojuje se přes USB rozhraní s počítačem. Využívá metodu slit (Štěrba) popsanou v kapitole 7.2.2 a lze jím měřit profil vlákna (2D, 3D), výkon svazku, stabilitu či kvalitu svazku a jiné. Byl zapotřebí software "ThorLabs Beam 4.0" dostupný ze stránek výrobce <http://thorlabs.com> a v příloze přikládám manuál k tomuto přístroji.

Každé vlákno bylo měřeno z obou stran pro proudy od 15mA do 40mA skokově po 5mA. Zaznamenával se výkon svazku, profil v ose X a Y, vypočítaný profil 2D i 3D. Dále byla u každého měření exportována data profilu osy X a Y do csv souboru oddělený tab., který je použitelný pro další zpracování a porovnávání v Matlabu. Bylo zjištěno, že měřený výkon je dosti nepřesný a je jedno jestli jsou jednotky v decibelech nebo ve watech, nebyl totiž kalibrovaný. Z tohoto důvodu byl výkon měřen pomocí měřiče výkonu, který je zobrazen na obrázku 35.



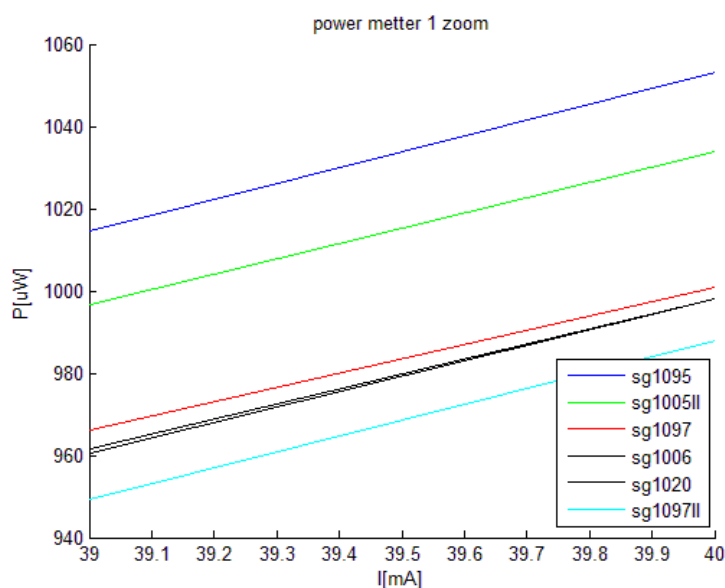
Obr. 35: Power meter ThorLabs PM3



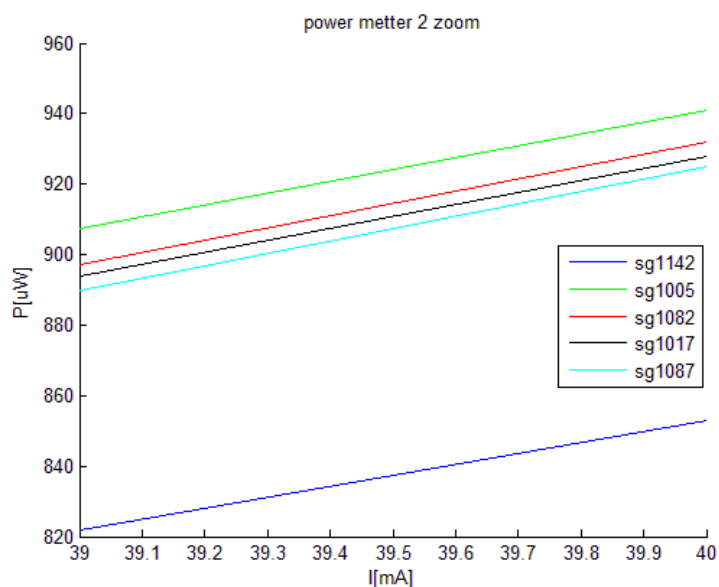
Obr. 36: P/I charakteristika kvazi-jednovodových vláken (šest nejlepších)

Stejným měřičem výkonu byla změřena P/I charakteristika laserové diody zobrazena na obrázku 36. Všechny měřené vzorky byly měřeny 5x pro oba směry od 15mA do 40mA. Graf obsahuje šest vláken, na kterých byl naměřen vyšší výkon. Bylo zbytečné zde dávat výkony všech měřených vzorků. Z grafu ovšem i tak nelze přesně určit, které vzorky dopadly nejlépe.

Z tohoto důvodu je na obrázku 37 přiblížený graf onych šesti nejlepších vzorků a na obrázku 38 je přiblížený graf zbylých pěti vláken. Nejlépe dopadlo vlákno SG1095 s průměrnou hodnotou výkonu 1,0537mW při 40mA budicího proudu diody. Naopak nejhůře dopadlo vlákno SG1142 0,8534mW při 40mA budicího proudu diody.

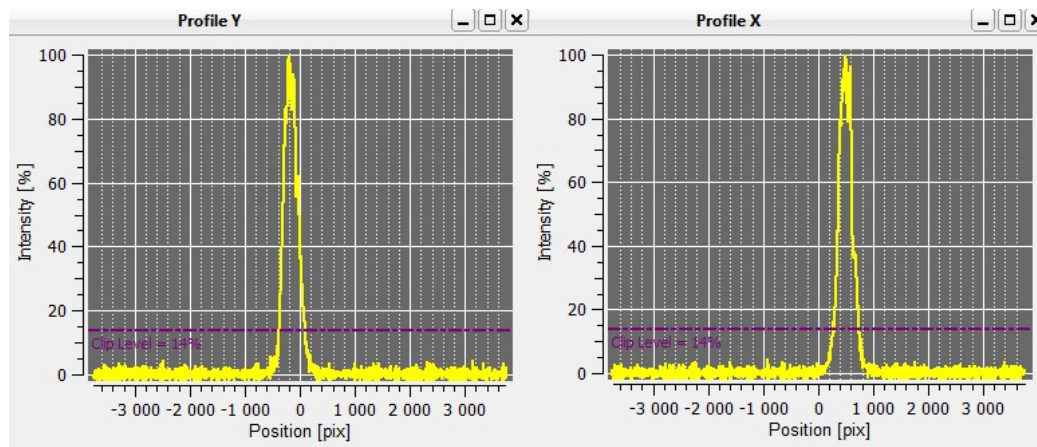


Obr. 37: P/I charakteristika kvazi-jednovidových vláken (zoom šesti nejlepších)



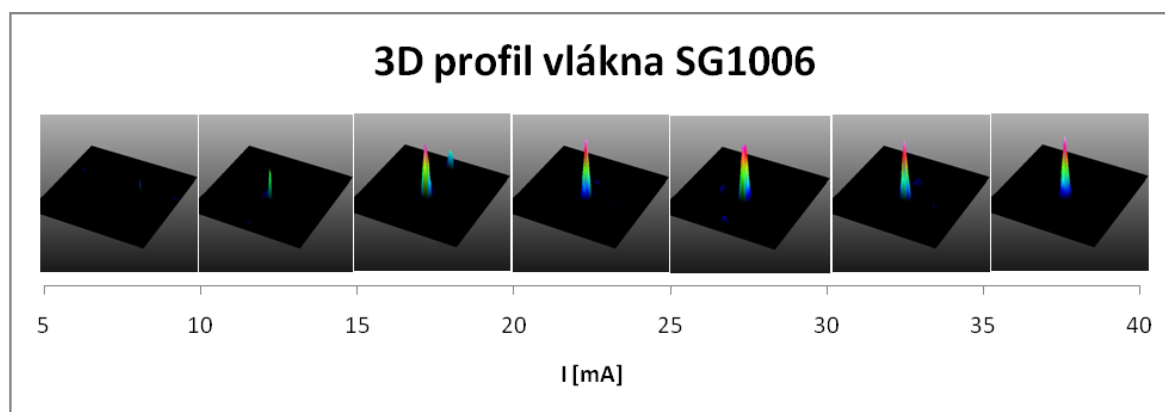
Obr. 38: P/I charakteristika kvazi-jednovidových vláken (zoom zbylých pěti)

Jak již bylo zmíněno, měření vlákna probíhalo z obou stran a bylo 5x opakováno. Na obrázku 39 jsou zobrazeny optické svazky vlákna SG1095 z prvního měření, dioda byla buzena 40mA ve směru AB. Na osách X jsou pozice svazku v pixelech a na osách Y jsou intenzity svazků v procentech. Jedná se o výstup z programu Thorlabs Beam 4.0, který je nutnou součástí měření optického svazku na přístroji Beam profiler.



Obr. 39: Profily vlákna SG1095, měření 1, 40mA, směr AB

Další ukládané výstupy byly 2D a 3D grafy optických svazků. Na obrázku 40 je zobrazeno sedm 3D profilů optického svazku vlákna SG1006. Dioda byla postupně buzena proudy od 5mA do 40mA. Na tomto obrázku je vidět, jak se optický svazek při zvyšování proudu zvětšoval. Dle datasheetu diody je prahový proud okolo hodnoty 25mA. Dioda ovšem začala "svítit" již při 10mA a svazek se postupně zvětšoval až do hodnoty 20mA. Dále se zdá být svazek stabilní a již se jeho intenzita nezvyšuje.



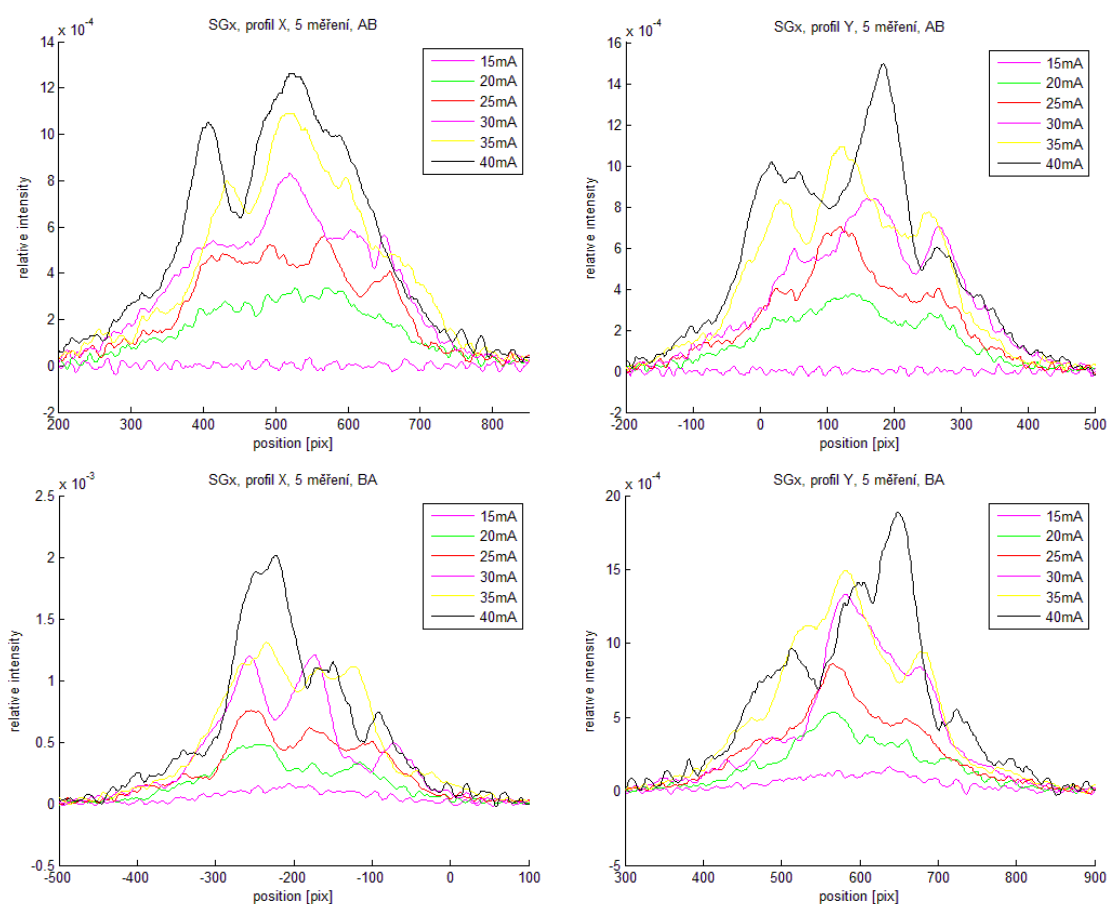
Obr. 40: 3D profily vlákna SG1006, měření 1, směr AB, 5mA-40mA

Z důvodu, že se zdají být optické svazky od 20mA do 40mA totožné, budu dále využívat data vyexportována programem Thorlabs Beam 4.0. Exportovaný soubor obsahoval pozice X a Y v pixelech s příslušnými relativními hodnotami intenzity. V nápovědě udávají, že jeden pixel je $6.45 \mu\text{m}$. Soubory jsou obsaženy v příloze ke každému vláknu, ze všech pěti měření pro hodnoty proudu 15, 20, 25, 30, 35 a 40 mA. Všechny jsou pojmenované "Device data.csv" a příklad takového souboru je zobrazen na obrázku 41.

Thorlabs Beam			
Version: 4.0 Build 127			
Date: 2011-02-15			
Time: 15:32:21			
Device: BP109-VIS Beam Profiler			
S/N: M00228548			
Pos X [pix]	X	Pos Y [pix]	Y
-3752	5.19E-05	3752	2.53E-07
-3751	6.94E-05	3751	1.11E-05
-3750	4.82E-05	3750	-2.88E-06

Obr. 41: Příklad Exportu Device Data.csv

Pro každé vlákno bylo ukládáno 60 hodnot ($6 \times 5 \times 2$). Celkem bylo tedy 660 souborů, které bylo třeba porovnat a vyhodnotit. Tento časově náročný úkol byl ulehčen vytvoření programu v jazyce JAVA, který pro každé vlákno vytvořil 6 souborů. Každý obsahoval hodnoty všech měření v obou směrech měření. Tyto hodnoty byly následně importovány do Matlabu, kde byly vykreslovány příslušné grafy.



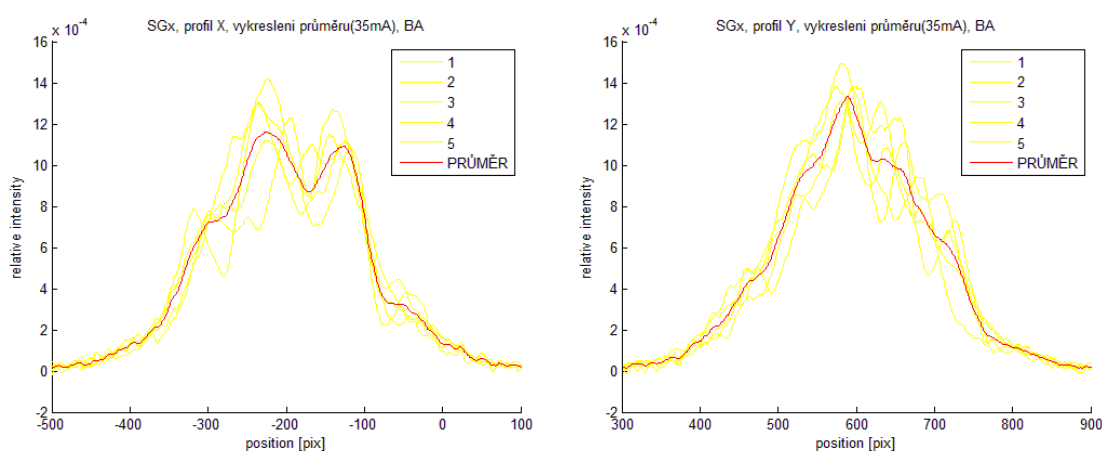
Obr. 42: Profily vlákna SG1095 podle osy X a Y, měření 5, 15-40mA

Na obrázku 42 jsou zobrazeny optické svazky vlákna SG1095 podle osy X a Y pro oba směry měření z pátého reprodukovatelného měření. V grafu jsou zobrazeny jednotlivé optické svazky pro proudy od 15mA do 40mA. Intenzita optického svazku se postupným zvyšováním budícího proudu diody zvyšoval. Z obrázku je patrné, že jednotlivé pozice na ose X nejsou shodné

a střed svazku neprochází nulou. Při měření ze směru AB se dají jednotlivé reprodukovatelné měření porovnat pod křivkou, ovšem měření BA už nikoli. Konektory se musely vyměnit a opětovné vložení druhého konektoru k přístroji Beam profiler na příslušnou pozici x, y je nemožné.

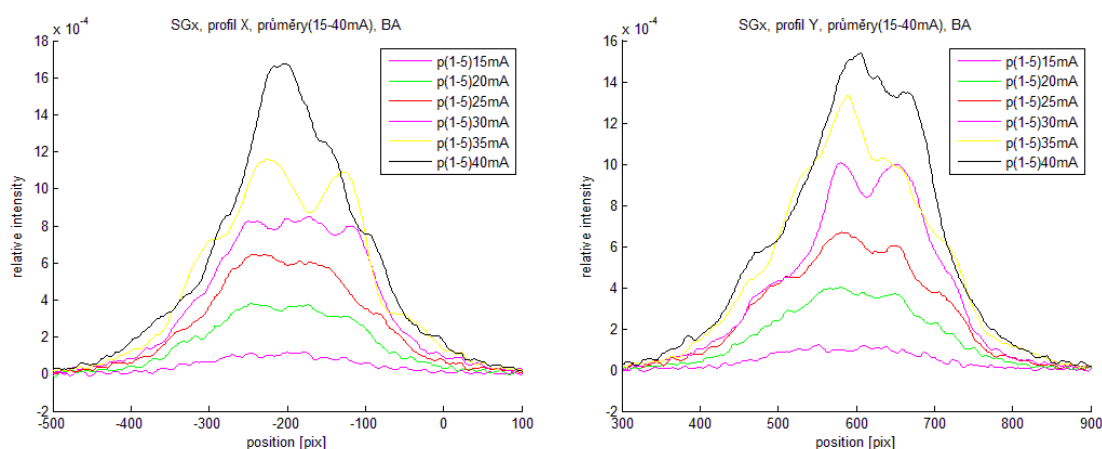
Již na první pohled jde vidět, že profily X a Y ve stejném směru měření nejsou shodné, což je to patrné z hodnot relativní intenzity. U žádného vlákna se profily podle osy X a Y neshodovaly!

Dále byl v Matlabu vykreslen aritmetický průměr z jednotlivých reprodukovatelných měření a vyneseno do grafu. Příklad aritmetického průměru lze vidět na obrázku 43, který zobrazuje vykreslení průměru vlákna SG1095 ve směru měření BA, pro 35mA budícího proudu diody.



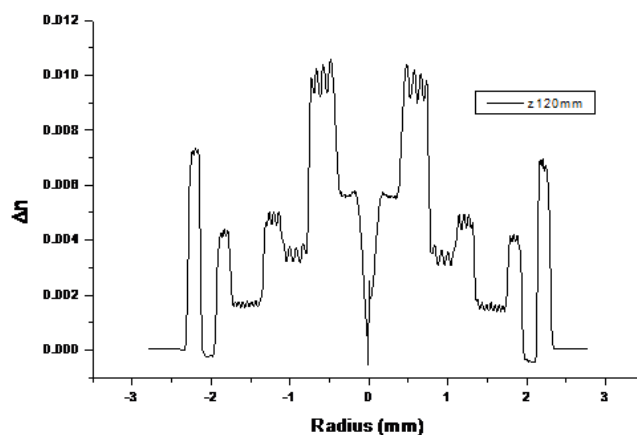
Obr. 43: Vykreslení průměru (m1-m5) vlákna SG1095, směr BA, 35mA

Tyto průměry byly poté vynášeny do jednotlivých grafů pro každé vlákno zvlášť, které byly následně porovnávány. Příklad vykreslení průměrných hodnot z pěti měření pro vlákno SG1095, ze směru BA je zobrazen na obrázku 44.



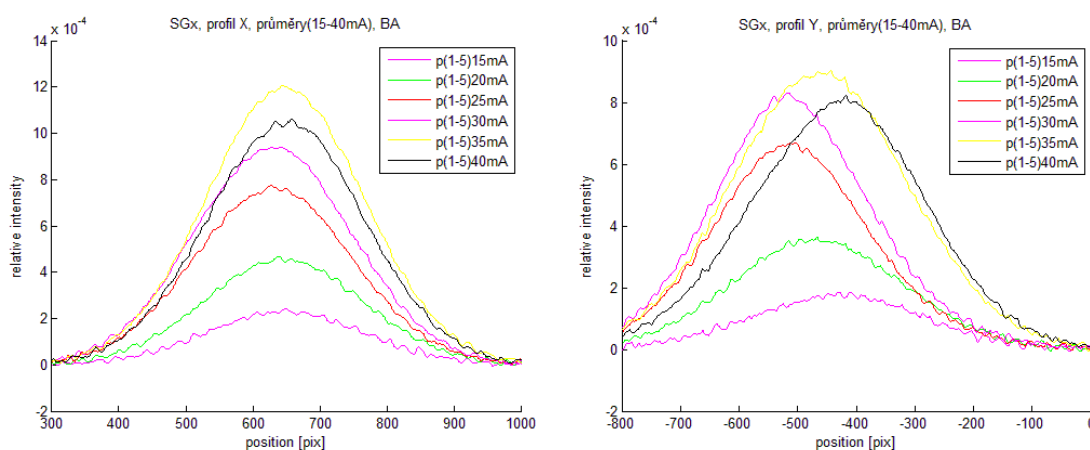
Obr. 44: Profil X a Y vlákna SG1095, průměrné hodnoty (m1-m5), 15- 40mA, směr BA

Ani z těchto pěti průměrných hodnot nelze říci, že jsou profily v ose X a Y shodné! Navíc nelze ani říci, že tyto svazky podle osy X či Y jsou osově souměrné!

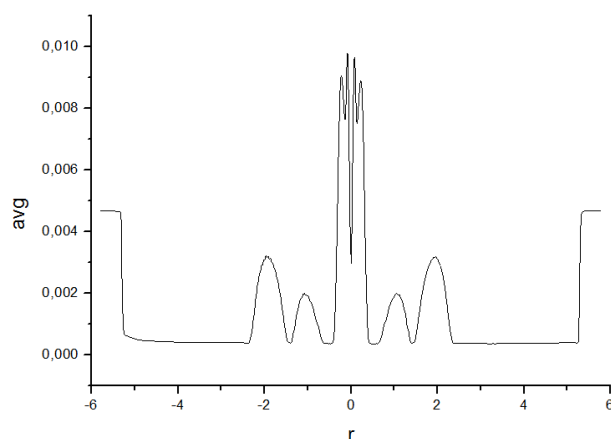


Obr. 45: Profil preformy SG1095

Na obrázku 45 je zobrazen profil preformy, ze které bylo vlákno SG1095 taženo. Výsledky měření zobrazené na obrázku 44 ani zdaleka nepřipomínají původní návrh. Jednotlivá maxima a minima vláken, která obsahovala více prstenců, byla těžko měřitelná. Výjimkou jsou vlákna, která obsahují jeden prstenec. Jsou to vlákna SG1006 a SG1017. Tento typ vláken se dal považovat za osově souměrný a profily podél osy X a Y za shodné. Průměrné hodnoty měření vlákna SG1006 ve směru BA jsou zobrazeny na obrázku 46 a profil preformy na obrázku 47.



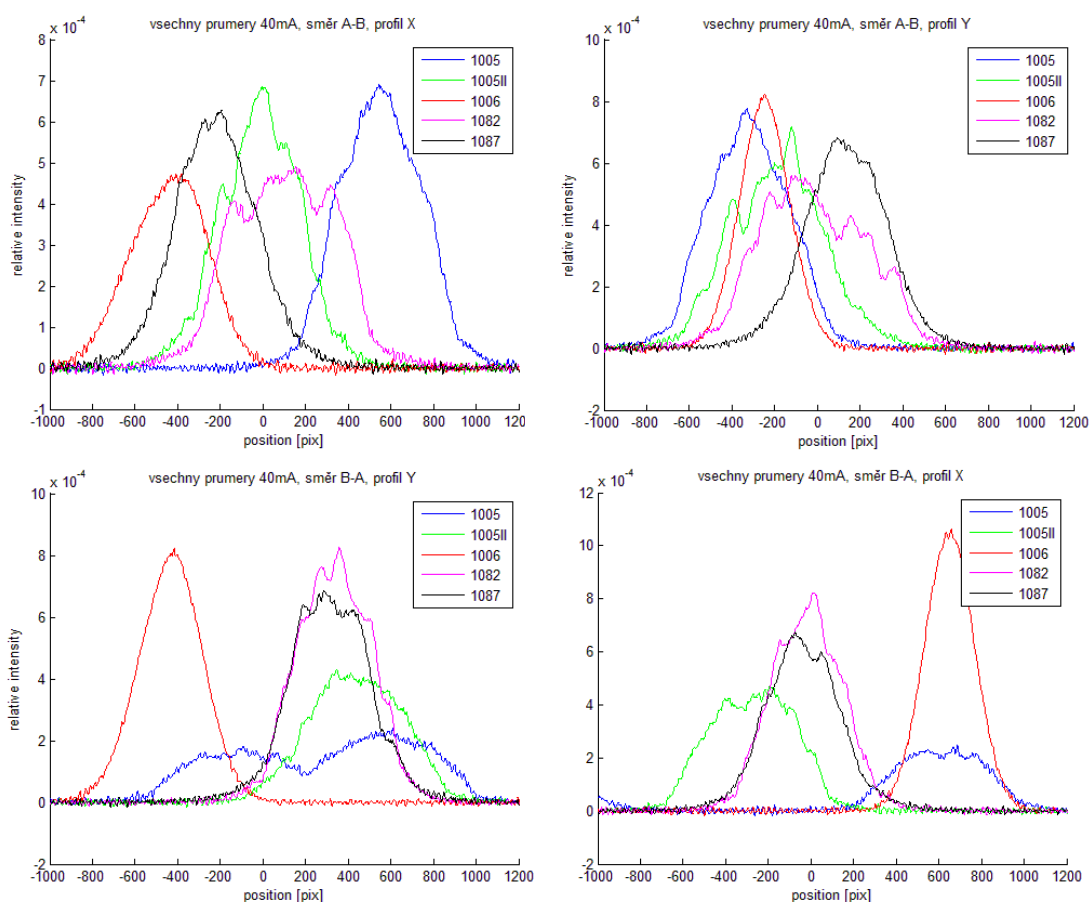
Obr. 46: Profil X a Y vlákna SG1006, průměrné hodnoty (m1-m5), 15- 40mA, směr BA



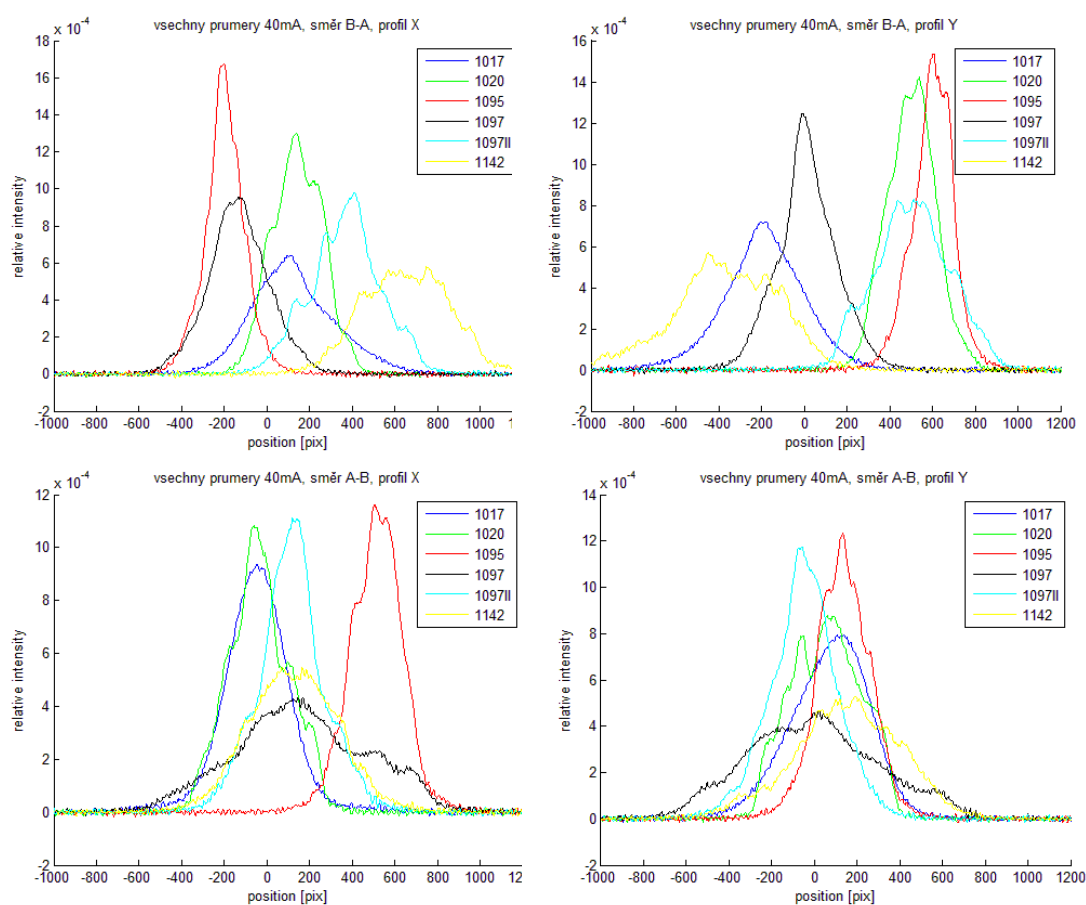
Obr. 47: Profil preformy SG1006

Ale ani tento typ vláken se nedal více porovnat, protože jednotlivá maxima a minima profilu preformy neodpovídala naměřeným hodnotám. Profil preformy obsahuje 8 maxim a 7 minim, kdežto naměřené hodnoty obsahují 1 maximum a žádné minimum.

Nakonec byly vykresleny průměrné relativní intenzity všech vláken pro 40mA z obou směrů měření. A vybráno vlákno s nejvyšší intenzitou. Tyto grafy jsou zobrazené na obrázku 48 a 49.



Obr. 48: Profily vláken podle osy X a Y, průměrné hodnoty m1-m5, 40mA

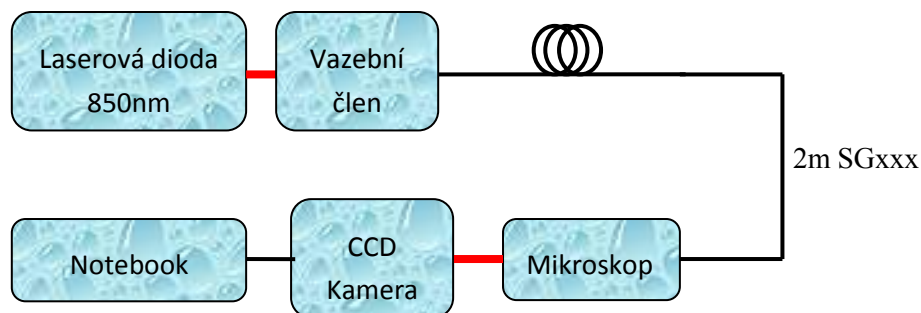


Obr. 49: Profily vláken podle osy X a Y, průměrné hodnoty m1-m5, 40mA

Vlákno SG1095 dosahovalo nejlepších hodnot ze všech měřených vláken nejen při měření útlumu přímou metodou 1c a nepřímou metodou OTDR, ale také optický svazek, který vystupoval z vlákna dosahoval v průměru nejvyšších hodnot relativní intenzity. Další vlákno, které dosahovalo vyšších hodnot bylo SG1097 a SG1020. Všechny hodnoty z měření a vytvořené grafy jsou uloženy na DVD pro další studie.

11.2. CCD kamera - měření vidového pole

Tento způsob měření nebyl tak časově náročný jako měření optického svazku a blokové schéma sestavy je na obrázku 50.



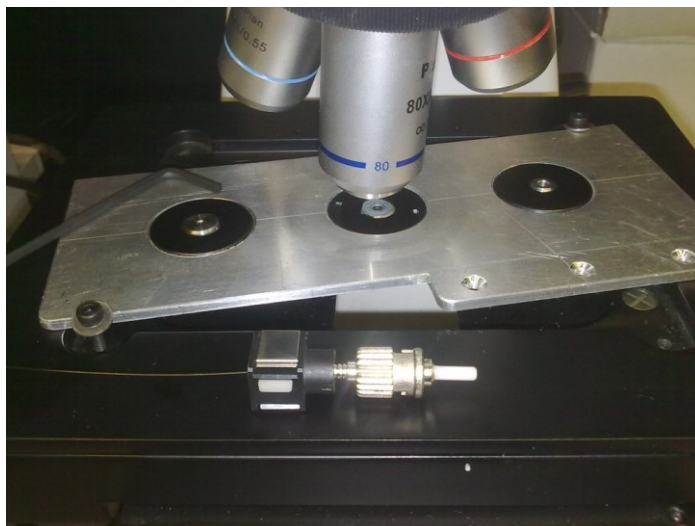
Obr. 50: Blokové schéma sestavy pro měření vidového pole

Blokové schéma se podobá schématu měření optického svazku, ovšem místo přístroje Beam profiler je zde mikroskop a CCD kamera zobrazený na obrázku 51. Příložené DVD obsahuje manuál a popis mikroskopu. V horní části mikroskopu je vidět CCD kamera přichycená na třetí tubus mikroskopu. Kamera byla propojena s notebookem pomocí USB rozhraní a pomocí programu TsView byly získávány snímky z kamery, které byly ukládány v nekomprimovaném bmp.



Obr. 51: Použitý mikroskop Arsenal LPT 3113i-T

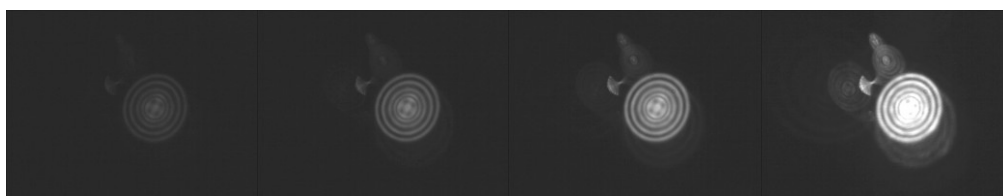
Disponuje rozlišením 2592x1944 pix a ostatní parametry jsou uloženy na DVD. Vláknem bylo nutno nějakým způsobem přichytit před objektiv mikroskopu tak, aby bylo fixně přichyceno ke křížovému stolku. V laboratoři již takový výrobek byl a obsahoval konektory typu ST a FC. Při měření vidového pole pomocí mikroskopu bylo využito konektory typu ST. Přípravek na uchycení vláken před objektiv se podařilo přichytit takovým způsobem, který dovozoval použít konektor typu ST. Na obrázku 52 je tento výrobek vyfocen.



Obr. 52: Držák optických vláken a konektor ST

Měřená vlákna obsahovala na jednom konci konektor FC, protože optické vlákno laserové diody obsahoval konektor FC a spojit tyto vlákna je možné pomocí spojky FC/FC. Na druhém konci vlákna byl konektor ST, aby jej bylo možné přichytit k mikroskopu.

Již při prvním měření se objevila saturace (obrázek 53). Vláknem byla pomocí mikroskopu přiblížena 50x a nebylo možné měřit vidové pole od 0mA do 40mA, ale od 0mA do cca 13mA. Nad 13mA se projevuje saturace a eliminovat ji je možné pomocí šedých filtrů (obrázek 54), ovšem ani toto řešení saturaci neeliminovalo. Použitá CCD kamera měla velkou citlivost a při dopadu výkonu v řádech μW se dostávala do saturace.



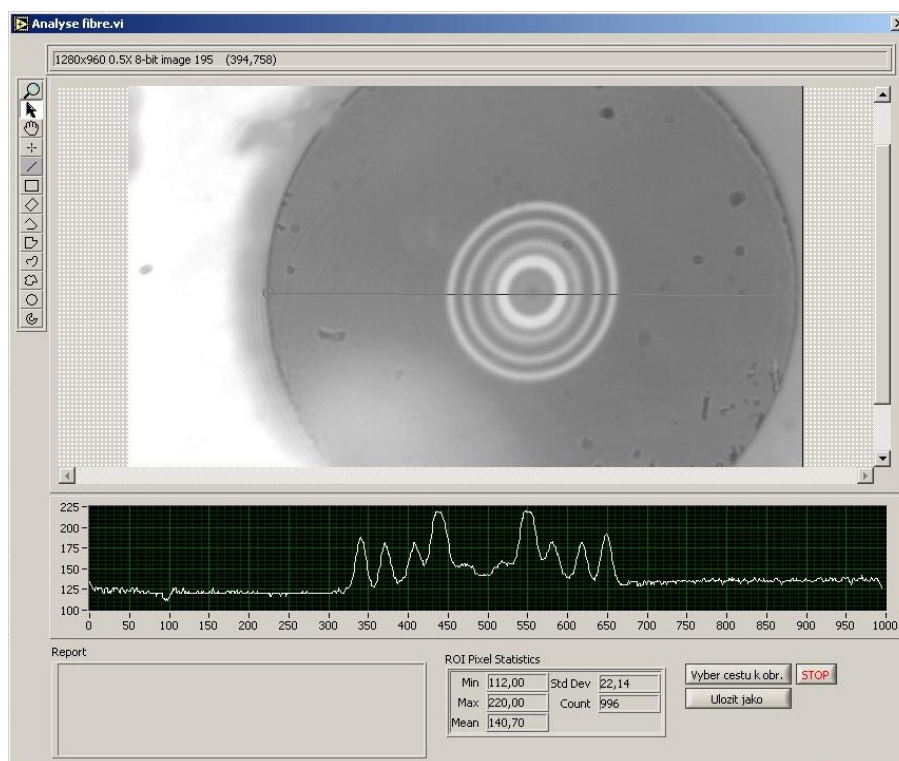
Obr. 53: Projevení saturace (5mA, 8mA, 11mA, 13mA)

Na obrázku 53 jsou zobrazeny čtyři snímky postupného zvyšování budicího proudu diody. U posledního snímku, kdy je dioda buzena 13mA se začíná projevovat saturace. Při postupném zvyšování proudu nad 13mA je vidové pole značně rozmazané. Proto byly ukládány a vyhodnocovány hodnoty pro proudy 5mA, 8mA a 11mA. Pokud vlákno mělo větší útlum, dalo se vyhodnotit také pro proud 13mA. Dále byly ukládány snímky vidového pole bez buzení diody za pomoci horního osvětlení mikroskopu.



Obr. 54: Sada šedých filtrů

Snímky vidového pole byly ukládány pomocí programu TsView a pomocí programu "analyze.exe" (obrázek 55), byly zobrazovány průběhy intenzity vidových polí.

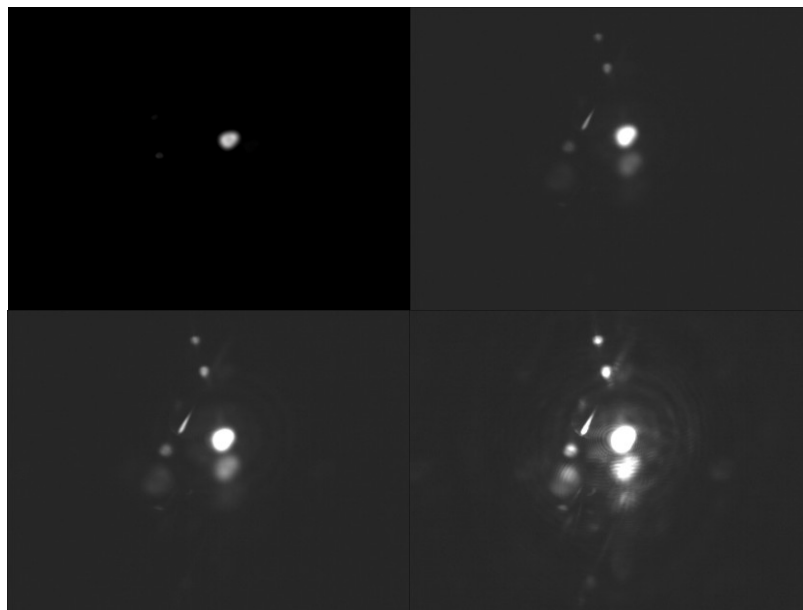


Obr. 55: Program analiza.exe a průběh intenzity vidového pole

Tyto průběhy intenzity byly exportovány do csv souboru (oddělený tab.) a v Matlabu vykreslovány grafy pro další vyhodnocování. Takto získané vidové pole byla nakonec srovnávány s profilem preformy. Tyto výpočty nelze srovnat pod křivkou, neboť soustava nedisponuje kalibračním měřítkem. K přibližnému srovnání výsledků byly zvoleny tyto kroky:

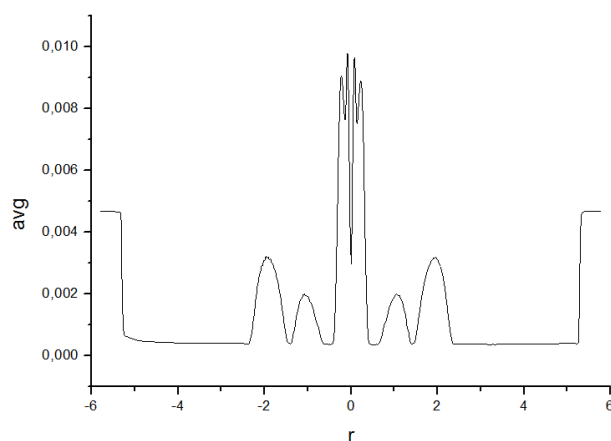
- Srovnání počtu maxim a minim
- Srovnání relativních poloh maxim a minim
- Srovnání relativních hodnot intenzit polí v maximech a minimech

SG1006



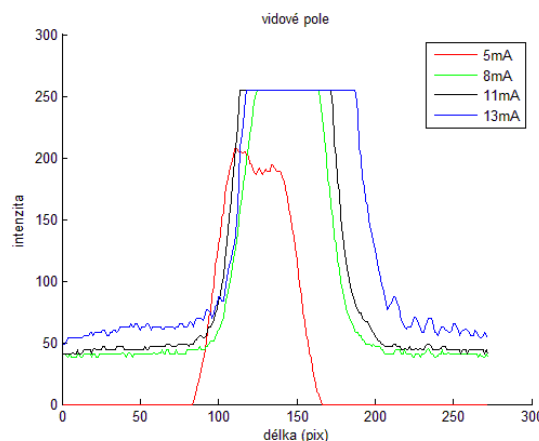
Obr. 56: SG1006 5mA, 8mA, 11mA, 13mA

Jednotlivé snímky na obrázku 56 jsou pořízeny bez zapnutého osvětlení třetího tubusu. Laser je postupně napájen 5mA, 8mA, 11mA a 13mA. Na druhém snímku je laser buzen 8mA a začíná se již projevovat saturace kamery, která je více zřetelná na čtvrtém snímku, kdy je dioda buzena 13mA. Z pořízených snímků je patrné, že veškeré množství energie, která se šíří vláknem, se koncentruje do středu. Je to patrné i z profilu preformy, který je zobrazen na obrázku 57.



Obr. 57: Profil preformy vlákna SG1006

Z naměřených výsledků, zobrazených na obrázku 58, nemůžeme porovnávat relativní hodnoty intenzit maxim a minim, protože koncentrovaný výkon značně zkresluje měření. Nepomohlo ani použití šedých filtrů či zvýšení přiblížení mikroskopu na 90x.

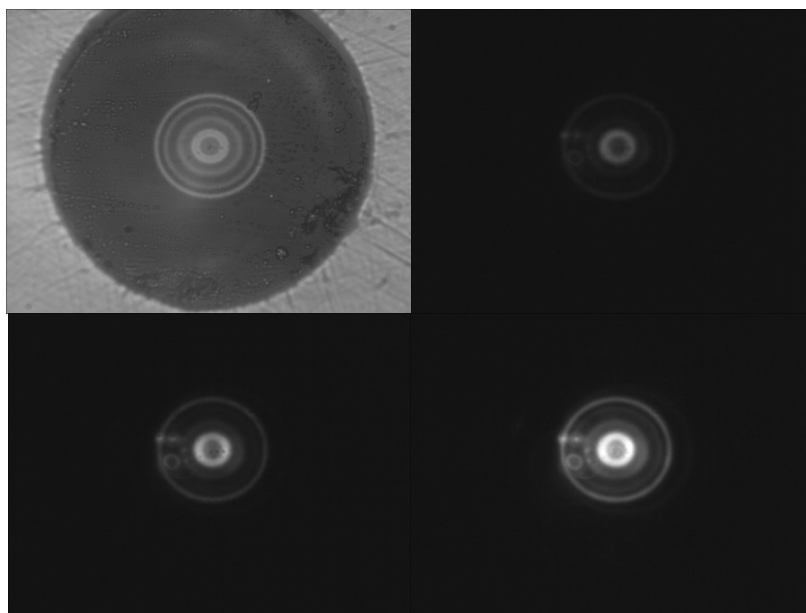


Obr. 58: Naměřené hodnoty intenzit vidového pole vlákna SG1006

Z naměřených výsledků vlákna SG1006 není možné porovnat tyto výsledky s profilem preformy neboť již pouhé srovnání počtu maxim a minim nesouhlasí. Z naměřených výsledků pozorujeme pouze jedno maximum, při 5mA můžeme pozorovat dva maxima, ale i to nesouhlasí s počtem 8 maxim a 7 minim z profilu preformy.

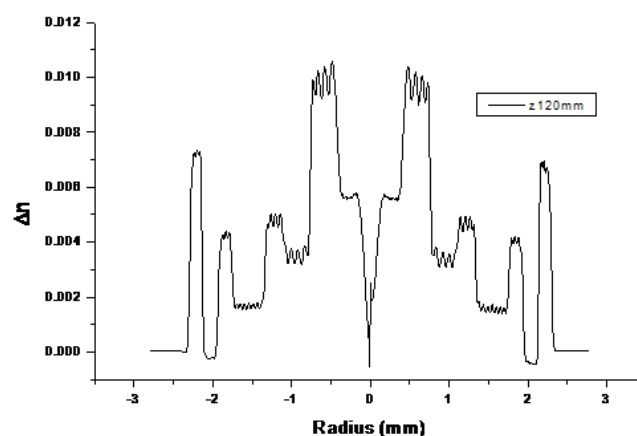
Veškerá energie byla koncentrována do středu vlákna, nešlo tedy rozpoznat 8 maxim a 7 minim. Shodné výsledky obsahuje vlákno SG1017, který má podobný profil označovaný jako "jeden prstenec". Tento typ vláken není možné srovnávat s preformou.

Vlákno SG1095



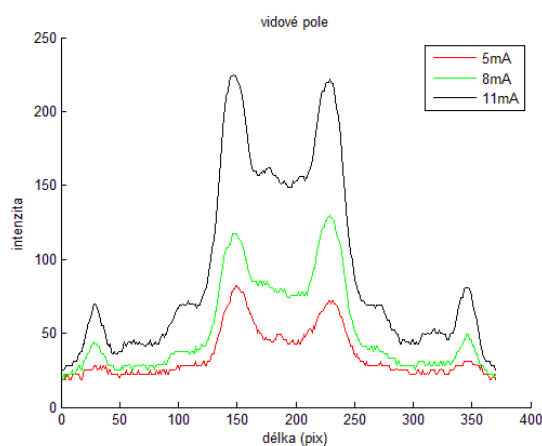
Obr. 59: SG1095 0mA, 5mA, 8mA, 11mA

První snímek je pořízen při zapnutém osvětlení horního tubusu, přičemž laser byl napájen 0A. Na dalších snímcích je již osvětlení vypnuto a laser je postupně napájen 5mA, 8mA a 11mA. Nad hodnotou 11mA se kamera dostávala do saturace. Více snímků tedy nebylo možné využít.



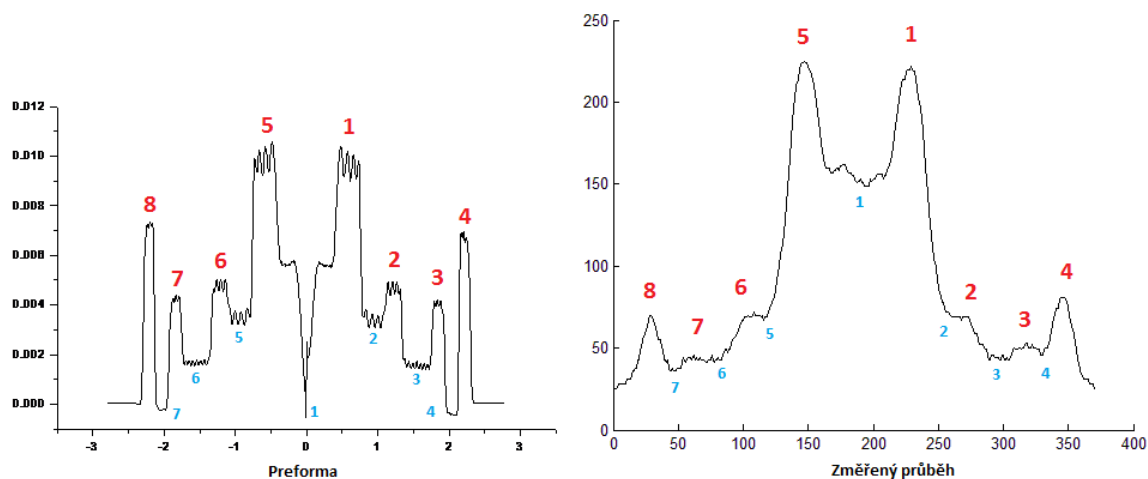
Obr. 60: Profil preformy vlákna SG1095

Na obrázku 60 je původní profil preformy, ze které bylo vlákno SG1095 taženo. Tento snímek bude porovnáván s naměřenými hodnotami zobrazenými na obrázku 61. Z naměřených výsledků je vidět, že dochází ke koncentraci velké části výkonu ve vnitřním kruhu.



Obr. 61: Naměřené hodnoty intenzit vidového pole vlákna SG1095

- Srovnání počtu maxim a minim

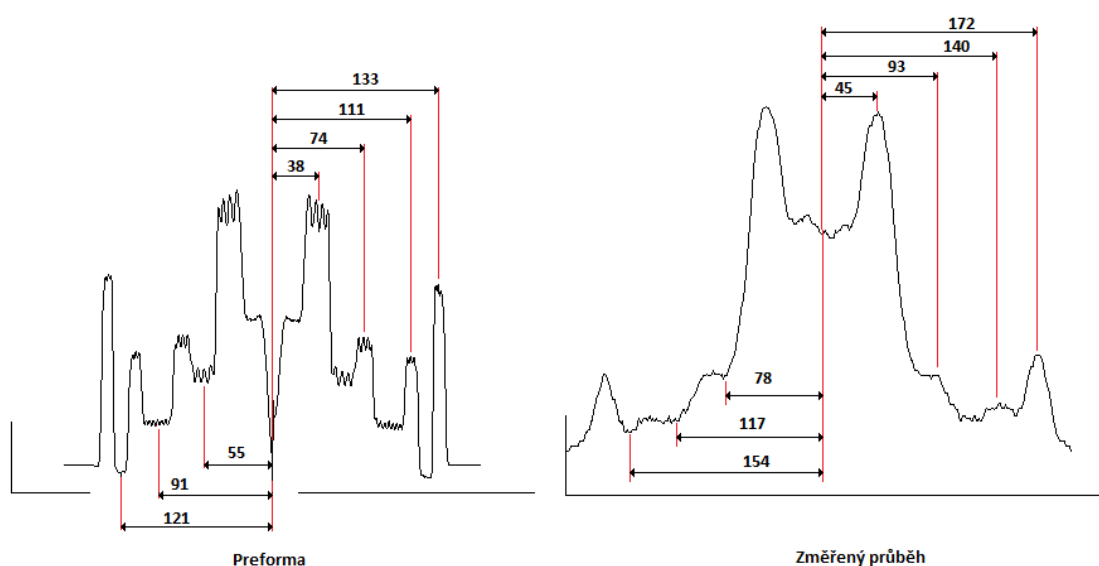


Obr. 62: Srovnání počtu maxim a minim vlákna SG1095 (11mA)

Ze srovnání počtu maxim a minim pro vlákno SG1095 při 11mA je patrné, že se počty maxim i minim shodují.

Je zřejmé, že minima 1 se liší velikostí intenzity. Dále se liší velikosti intenzit všech maxim a všech minim. Tyto výsledky více prozkoumáme dopočtením relativní intenzity a relativní polohy maxim a minim.

- Srovnání relativních poloh maxim a minim



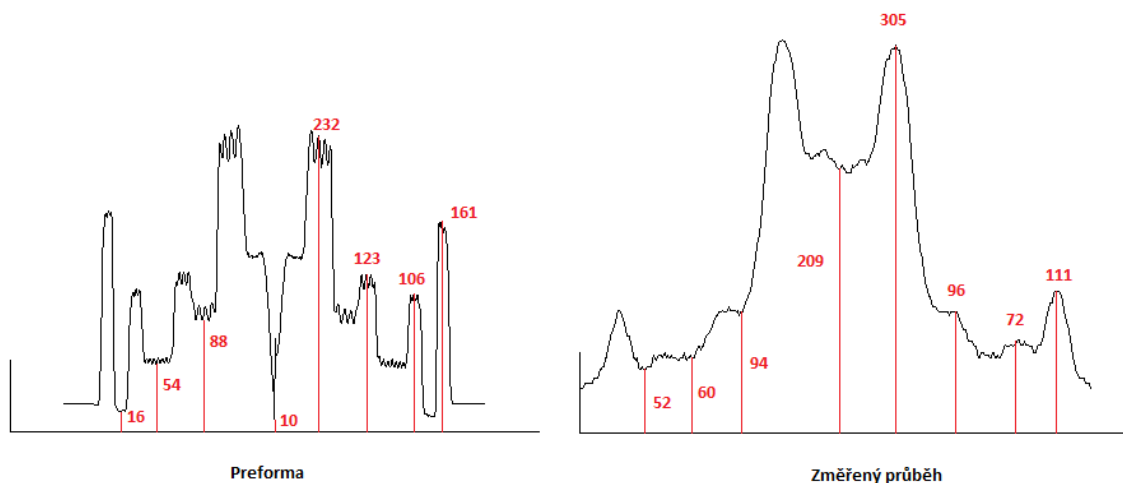
Obr. 63: Srovnání relativních poloh maxim a minim vlákna SG1095 (11mA)

Tab. 3: Relativní polohy maxim a minim vlákna SG1095

relativní polohy maxim a minim			
změřené	MAX	MIN	
	45 x	78 x	
	93 2,066x	117 1,5x	
	140 3,111x	154 1,974x	
	172 3,822x		
preforma	MAX	MIN	
	38 x	55 x	
	74 1,947x	91 1,654x	
	111 2,921x	121 2,2x	
	133 3,5x		

Tabulka 3 ukazuje vypočítané relativní polohy maxim a minim vůči vertikální ose souměrnosti. Lze říci, že výsledky relativních poloh maxim se liší s maximální odchylkou přibližně 9,2% a minim s maximální odchylkou přibližně 10,3%.

- Srovnání relativních hodnot intenzit polí v maximech a minimech



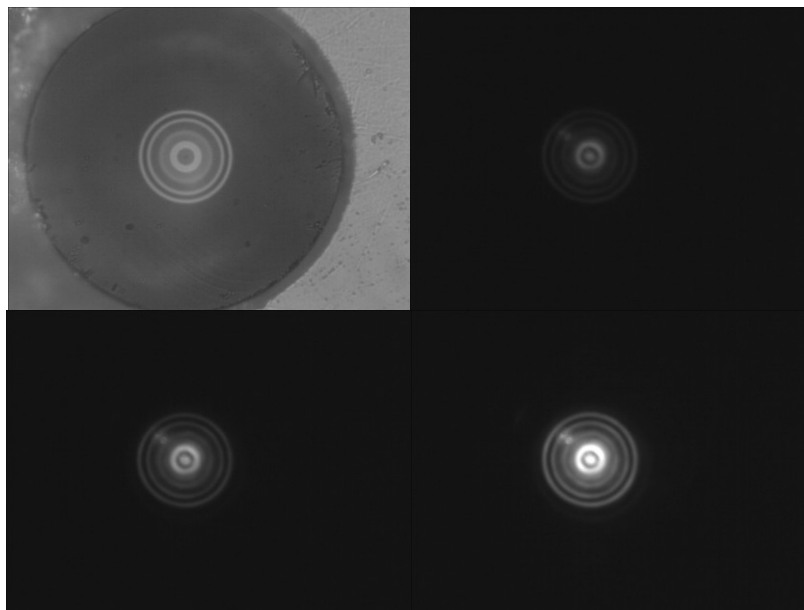
Obr. 64: Srovnání relativních intenzit polí vlákna SG1095 (11mA)

Tab. 4: Relativní intenzity maxim a minim vlákna SG1095

relativní intenzity maxim a minim			
změřené	MAX	MIN	
	305	x	209
	96	0,314x	94
	72	0,236x	60
	111	0,363x	52
preforma	MAX	MIN	
	232	x	10
	123	0,530x	88
	106	0,456x	54
	161	0,693x	16

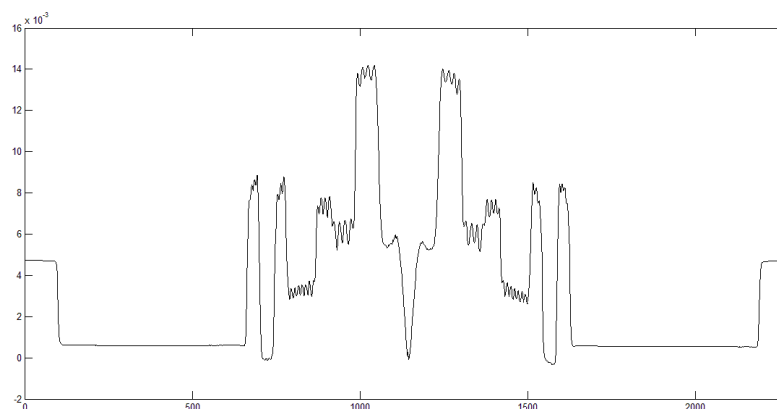
Tabulka 4 ukazuje vypočítané relativní intenzity maxim a minim vůči vertikální ose souměrnosti. Uvedené hodnoty intenzit maxim a minim u změřeného průběhu jsou aritmetické průměry obou sobě odpovídajících hodnot nalevo a napravo od osy souměrnosti. Lze říci, že výsledky maxim se liší s maximální odchylkou přibližně 47,7% a minim s odchylkou od 18,8 % do 146% a v jednom případě 1593%. Takto velké odchylky bylo docíleno vlivem velkého výkonu koncentrovaného uprostřed vlákna, který zkresluje výsledky.

SG1097 I



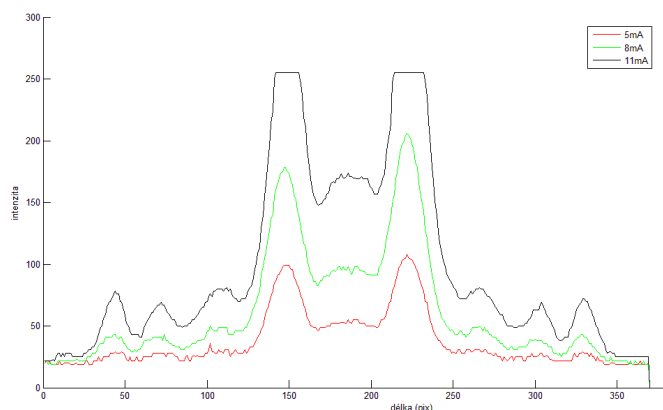
Obr. 65: SG1097 I 0mA, 5mA, 8mA, 11mA

První snímek je pořízen při zapnutém osvětlení horního tubusu, přičemž laser byl napájen 0A. Na dalších snímcích je již osvětlení vypnuto a laser je postupně napájen 5mA, 8mA a 11mA. Nad hodnotou 11mA se kamera dostávala do saturace.



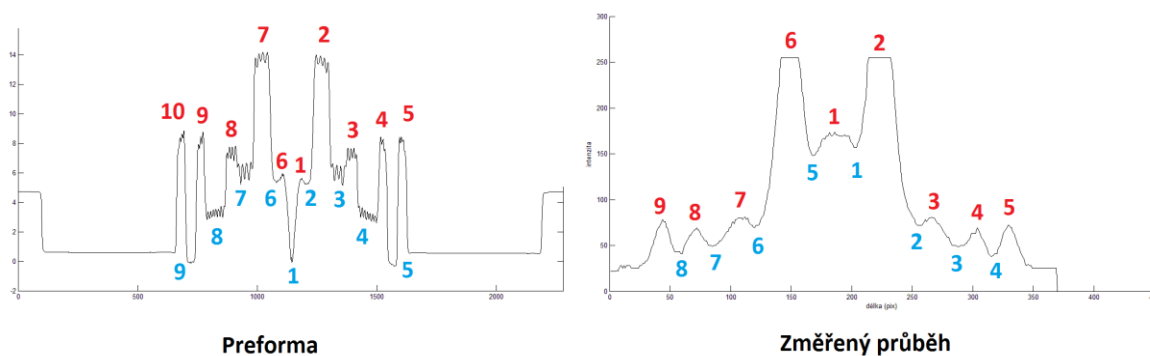
Obr. 66: Profil preformy vlákna SG1097 I

Na obrázku 66 je zobrazen profil preformy, ze které bylo vlákno SG1097 taženo. Tento snímek bude porovnáván s naměřenými hodnotami zobrazenými na obrázku 67. Dále tyto výsledky více prozkoumáme dopočtením relativní intenzity a relativní polohy maxim a minim.



Obr. 67: Naměřené hodnoty intenzit vidového pole vlákna SG1097 I

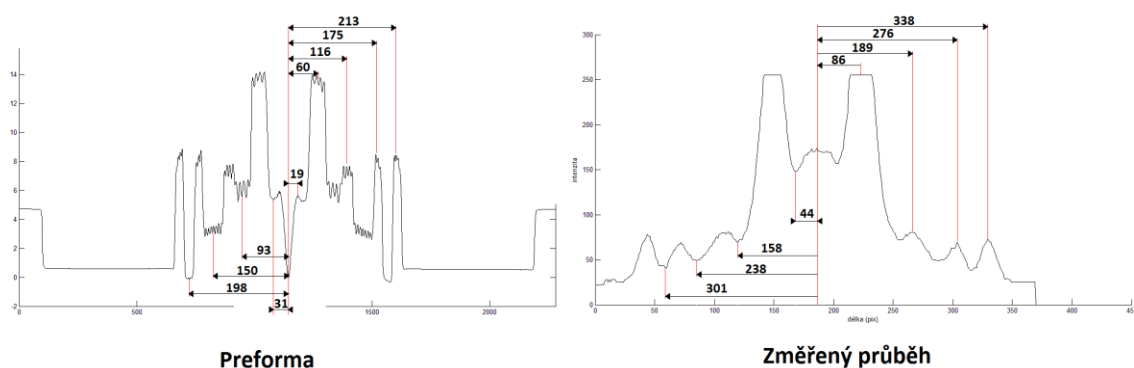
- Srovnání počtu maxim a minim



Obr. 68: Srovnání počtu maxim a minim vlákna SG1097 I (11mA)

Ze srovnání počtu maxim a minim pro vlákno SG1097 při 11mA je patrné, že se počty maxim i minim neshodují. Preforma obsahuje minimum 1, která se na změřeném průběhu intenzity neobjevuje. Oba průběhy ovšem obsahují 8 dominantních maxim 6 dominantních minim, které lze vzájemně porovnat. Tyto výsledky více prozkoumáme dopočtením relativní intenzity a relativní polohy maxim a minim.

- Srovnání relativních poloh maxim a minim



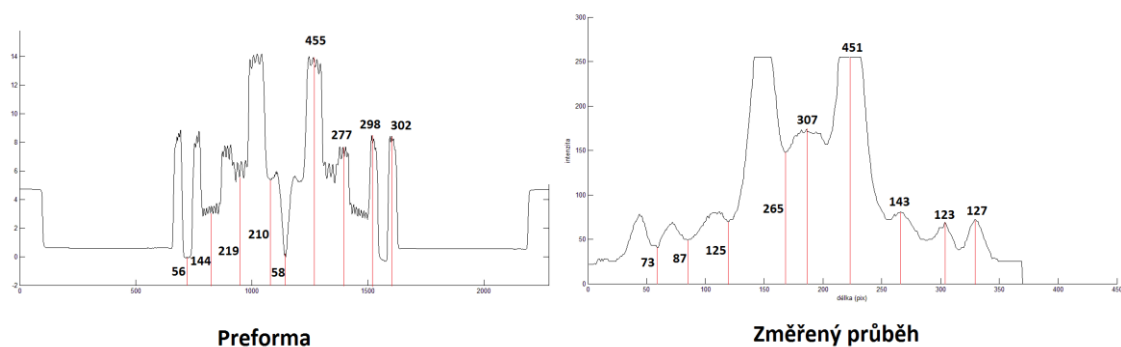
Obr. 69: Srovnání relativních poloh maxim a minim vlákna SG1097 I (11mA)

Tab. 5: Relativní polohy maxim a minim vlákna SG1097 I

relativní polohy maxim a minim					
změřené	MAX		MIN		
	86	x	44	x	
	189	2,197x	158	3,59x	
	276	3,209x	238	5,409x	
	338	3,930x	301	6,84x	
preforma	MAX		MIN		
	19	0,316x	31	x	
	60	x	93	3x	
	116	1,933x	150	4,838x	
	175	2,916x	198	6,387x	
	213	3,55x			

Tabulka 5 ukazuje vypočítané relativní polohy maxim a minim vůči vertikální ose souměrnosti. Lze říci, že výsledky relativních poloh maxim se liší s maximální odchylkou přibližně 13,6% a minim s maximální odchylkou přibližně 19,6%.

- Srovnání relativních hodnot intenzit polí v maximech a minimech



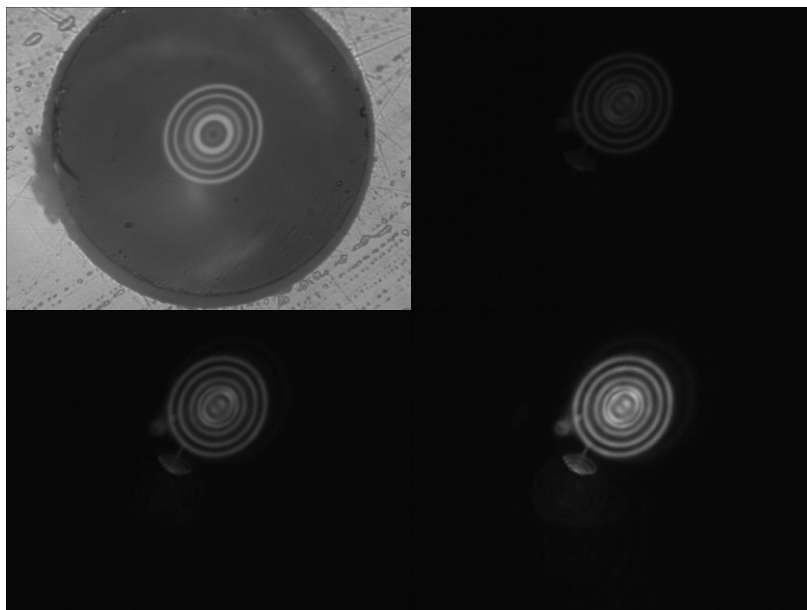
Obr. 70: Srovnání relativních intenzit polí vlákna SG1097 I (11mA)

Tab. 6: Relativní intenzity maxim a minim vlákna SG1097 I

relativní intenzity maxim a minim			
změřené	MAX	MIN	
	307	x	
	451	1,469x	265 0,863x
	143	0,465x	125 0,407x
	123	0,4x	87 0,283x
	127	0,413x	73 0,237x
preforma	MAX	MIN	
	220	x	58 0,263x
	455	2,068x	210 0,954x
	277	1,259x	219 0,995x
	298	1,354x	144 0,654x
	302	1,372x	56 0,254x

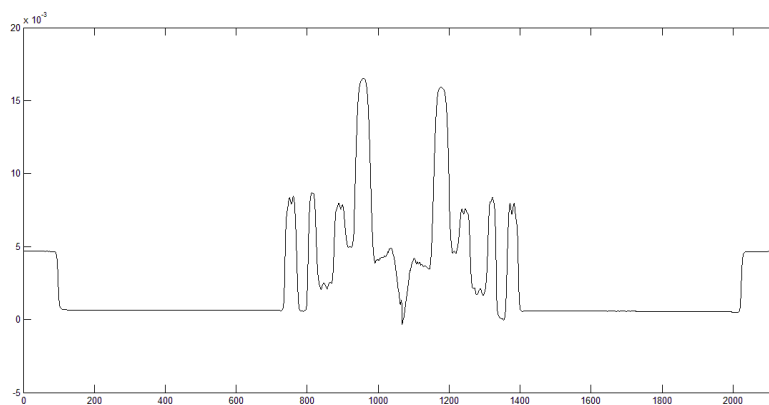
Tabulka 6 ukazuje vypočítané relativní intenzity maxim a minim vůči vertikální ose souměrnosti. Uvedené hodnoty intenzit maxim a minim u změřeného průběhu jsou aritmetické průměry obou sobě odpovídajících hodnot nalevo a napravo od osy souměrnosti. Lze říci, že výsledky maxim se liší s odchylkou přibližně od 29% do 70,5 % a minim s odchylkou od 6,7 % do 59 %.

SG1142



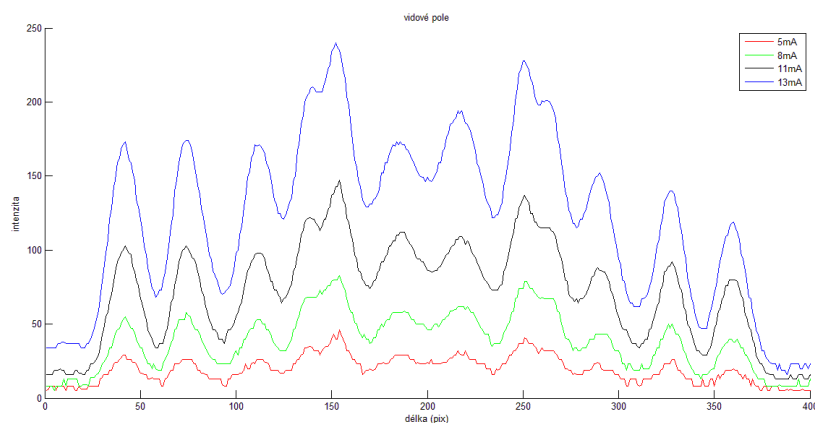
Obr. 71: SG1142 0mA, 5mA, 8mA, 11mA

První snímek je pořízen při zapnutém osvětlení horního tubusu, přičemž laser byl napájen 0A. Na dalších snímcích je již osvětlení vypnuto a laser je postupně napájen 5mA , 8mA a 11mA. Nad hodnotou 11mA se kamera dostávala do saturace. Z pořízených snímků je zřejmý eliptický tvar vidového pole a to svědčí o kvalitě výroby vlákna.



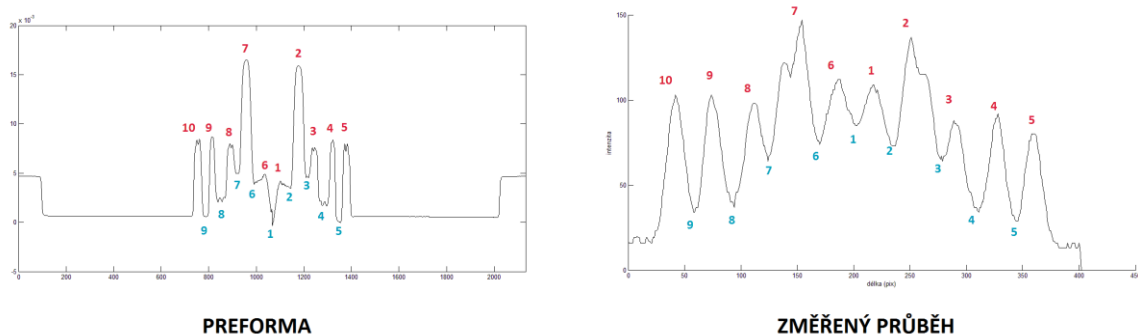
Obr. 72: Profil preformy vlákna SG1142

Na obrázku 72 je původní profil preformy, ze které bylo vlákno SG1142 taženo. Tento snímek bude porovnáván s naměřenými hodnotami zobrazenými na obrázku 73. Dále tyto výsledky více prozkoumáme dopočtením relativní intenzity a relativní polohy maxim a minim.



Obr. 73: Naměřené hodnoty intenzit vidového pole vlákna SG1142

- Srovnání počtu maxim a minim

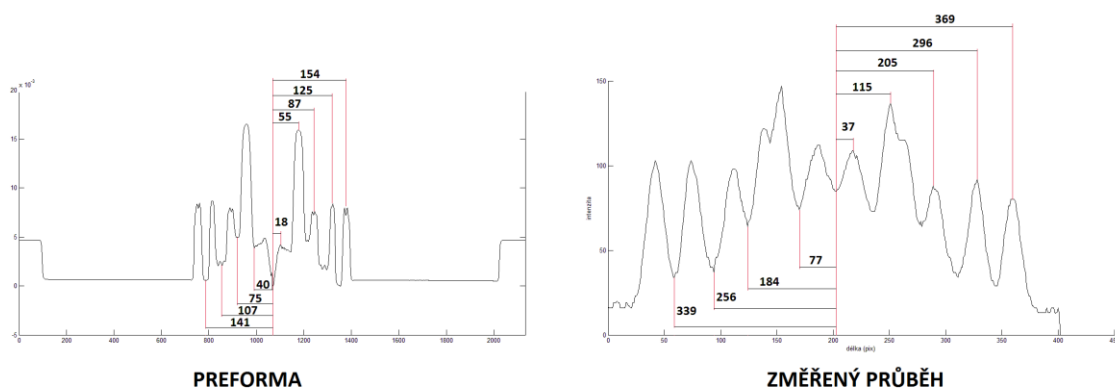


Obr. 74: Srovnání počtu maxim a minim vlákna SG1142 (11mA)

Ze srovnání počtu maxim a minim pro vlákno SG1142 při 11mA je patrné, že se počty maxim i minim shodují.

Je zřejmé, že minima 1 se liší velikostí intenzity. Dále se liší velikosti intenzit maxima 1 a 6 i minima 2 a 6. Dále tyto výsledky více prozkoumáme dopočtením relativní intenzity a relativní polohy maxim a minim.

- Srovnání relativních poloh maxim a minim



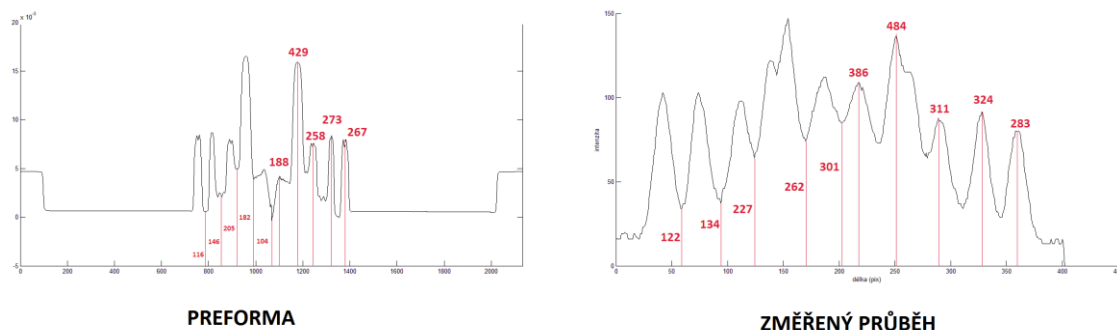
Obr. 75: Srovnání relativních poloh maxim a minim vlákna SG1142 (11mA)

Tab. 7: Relativní polohy maxim a minim vlákna SG1142

relativní polohy maxim a minim			
změřené	MAX		MIN
	37	x	77
	115	3,108x	184
	205	5,54x	256
	296	8	339
	369	9,972x	
preforma	MAX		MIN
	18	x	40
	55	3,055x	75
	87	4,833x	107
	125	6,944x	141
	154	8,555x	

Tabulka 7 ukazuje vypočítané relativní polohy maxim a minim vůči vertikální ose souměrnosti. Lze říci, že výsledky relativních poloh maxim se liší s odchylkou přibližně od 1,7% do 16,5% a minim s maximální odchylkou přibližně 27,4%.

- Srovnání relativních hodnot intenzit polí v maximech a minimech



Obr. 76: Srovnání relativních intenzit polí vlákna SG1142 (11mA)

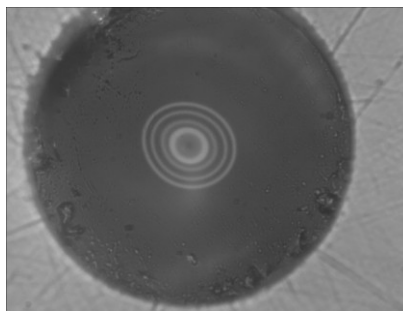
Tab. 8: Relativní intenzity maxim a minim vlákna SG1142

relativní intenzity maxim a minim			
změřené	MAX	MIN	
	386 x	301	0,779x
	484 1,253x	262	0,678x
	311 0,805x	227	0,588x
	324 0,839x	134	0,347x
	283 0,733x	122	0,316x
preforma	MAX	MIN	
	188 x	104	0,553x
	429 2,281x	182	0,968x
	258 1,372x	205	1,090x
	276 1,468x	144	0,765x
	267 1,420x	116	0,617x

Tabulka 8 ukazuje vypočítané relativní intenzity maxim a minim vůči vertikální ose souměrnosti. Uvedené hodnoty intenzit maxim a minim u změřeného průběhu jsou aritmetické průměry obou sobě odpovídajících hodnot nalevo a napravo od osy souměrnosti. Lze říci, že výsledky maxim se liší s maximální odchylkou přibližně od 48,4% a minim s odchylkou od 30% do 54,7%.

12. Závěr

Výroba těchto atypických optických vláken není jednoduchá. Aby bylo možné takto atypickou strukturu vyrobit, je nutné vytvořit na profilu schody. Jsou-li požadované schody co nejostřejší, musí se dopovat. Dopováním se zavleče do struktury napětí, které snižuje index lomu schodů. Aby se udržel požadovaný index lomu schodu i přes napětí, více se do struktury dopuje. Nakonec když je preforma s požadovaným profilem hotová, táhne se do vlákna, ve kterém se objevuje další napětí, které časem relaxuje v řádech několika let. Čím je struktura menší, tím se doba relaxace zmenšuje a vlákno degraduje rychleji. Na obrázku 77 je zobrazena deformace vlákna SG1087, která pravděpodobně vznikla vlivem napětí při tažení z preformy. Tyto deformace se objevily i u dalších vláken.



Obr. 77: SG1087

Uvažuje se o chlazení preformy, aby napětí při výrobě preformy bylo co nejmenší. Jenže po tažení do vlákna se opět indukuje napětí (radiální i podélné). Tento krok bohužel obejít nelze. Kdysi byly provedeny zkoušky dopováním TiO_2 , ale reálně se to neujalo. Mohl by pomoci návrh profilu, který nebude mít ostré přechody. Byly by zaobleny a napětí by se měnilo postupně. Do budoucna by se mělo těchto poznatků využít a při návrhu vláken využívat zaoblené přechody.

Z počátku byly na všechna vlákna navařeny pigtaily a poté byl u všech vláken měřen útlum přímou metodou 1c. Pro upřesnění výsledků byla použita i nepřímá metoda OTDR, která navíc změřila délku vlákna, nehomogenity vlákna, kvalitu spojů a další.

Svařování vláken se ukázalo jako nevhodné, z důvodu porušení atypické profilové struktury při svařování a z důvodů použití rozdílných hodnot parametru MFD vláken a pigtailů. Také metoda 1c se ukázala jako špatně zvolená, díky oné hodnotě MFD. Pro další studie doporučuji při měření útlumu, využít montážních konektorů, aby se eliminoval rozdíl velikostí MFD.

Z tohoto důvodu nebyl měřený útlum přímou metodou 1C přesný. Metoda OTDR tyto výsledky zpřesnila a poukázala na kvalitu spojů. Vláknem SG1005 dosahuje 28 dB/km ve směru AB, ze směru BA 138 dB/km. To poukazuje na nevhodný svár, či zlomení vlákna ve směru BA. Vláknem SG1082 disponuje podobnými výsledky. Nejlepších hodnot útlumu dosahovala vlákna SG1095, SG1142, SG1006 v průměru od 2 - 10 dB/km.

Měření útlumu probíhalo na vlnových délkách 1310nm a 1550nm v obou směrech. Důležitá vlnová délka je 1550nm, protože na této vlnové délce se předpokládá využití kvazi-jednovidového

vlákna jako telekomunikačního média. Dalším úkolem bylo reprodukovatelné měření kvazi-jednovidových optických vláken na vlnové délce 850 nm, protože na této vlnové délce by vlákno fungovalo jako senzor.

Za tímto účelem bylo sestaveno experimentální pracoviště, které plnilo funkci měření optického svazku pomocí přístroje beam profiler a měření vidového pole pomocí CCD kamery. Měření probíhalo s laserovou diodou na vlnové délce 850 nm a značnou mírou bylo ovlivněno nestabilitou zdroje záření. Maximální výkon LD při buzení 40mA dosahoval hodnot od 1,253 do 1,308 mW. Při reprodukovatelném měření výkon klesal v řádech desítek μW . Musím podotknout, že teplota byla regulována na 25°C a při celém měření se nezvýšila o více než 0,02°C. Nastavené hodnoty proudu byly vždy nastavené v mezích $\pm 0,02\text{mA}$.

Při měření optického svazku pomocí Beam profileru se projevila ona nestabilita zdroje záření. Po každém reprodukovatelném měření nebyly naměřeny shodné výsledky a optické svazky ne příliš připomínaly původní návrhy vláken. Optické svazky nebyly osově souměrné, profily podle os x a y nebyly shodné a navíc nešlo rozlišit jednotlivé vidy. Výjimku tvoří vlákna s tzv. "jedním prstencem". Jedná se o vlákna SG1006 a SG1017. Optické svazky, které byly naměřeny na tomto typu vlákna, byly ze všech vzorků nejvíce podobné původnímu návrhu, ovšem ani z daleka nešlo tyto relativní hodnoty intenzit porovnat s návrhem, neboť nešlo rozpoznat jednotlivá maxima a minima. Na konec byly vykresleny aritmetické průměry ze všech reprodukovatelných měření pro všechny vlákna z měření, kdy byla laserová dioda buzena 40mA. Nejvyšší hodnoty relativní intenzity dosahovalo vlákno SG1095, pak vlákno SG1020 a SG1097. Vlákna nebylo možné jiným způsobem porovnat díky nestabilitě zdroje záření, který navíc nedosahoval hodnot výkonu zapsaných v datasheetu.

Měření vidového pole pomocí CCD kamery poukázalo na vysokou citlivost čipu, což měla za následek saturaci kamery při buzení diody proudy nad 13mA. Bohužel nebylo možné provést srovnání pomocí výpočtu pod křivkou, protože měřící soustava nedisponuje kalibračním měřítkem mikroskopu. Z tohoto důvodu byly srovnávány naměřené počty, relativní polohy a relativní intenzity maxim a minim s profilem preformy. Vlákna SG1095, SG1142, SG1097 I a SG1006 byla vybrána z důvodu nejmenších hodnot měrných útlumů. Další vlákna, která dosahovala vyšších hodnot měrného útlumu nebyla v této diplomové práci více rozebrána, ale naměřené hodnoty včetně všech grafů jsou uloženy na přiloženém DVD.

Vlákna typu "mnoho prstenců" (SG1095, SG1097, SG1142) lze porovnávat a dále studovat, ale vlákna typu "jeden prstenec" (SG1006) nikoliv, díky soustředění energie ke středu vlákna. Není totiž možné rozlišit jednotlivé maxima a minima. Vlákna typu "mnoho prstenců" dosahovala podobných výsledků při srovnání počtu maxim a minim. Při srovnání relativních poloh maxim a minim se maximální odchylky pohybovaly od 10% do 30%. Odchylky relativních intenzit polí v maximech a minimech byly v mezích od 47,7% do 70,5%. Takto velké odchylky jsou dány nestabilitou zdroje záření, převodem ze snímku na jednotlivé průběhy intenzit a v poslední řadě kvalitou výroby vlákna.

Na závěr práce bych vyzdvihl tato vlákna:

SG1095, které dosáhlo nejnižšího měrného útlumu okolo 2dB/km při 1550nm. Vidové pole odpovídá návrhu s maximální odchylkou 10,3% relativní polohy maxim a minim. Relativní intenzity maxim a minim se liší s maximální odchylkou 47,7% pokud zanedbáme relativní intenzitu minima číslo 1.

SG1142, které dosáhlo měrného útlumu okolo 7dB/km při 1550nm. Vidové pole odpovídá návrhu s maximální odchylkou 27,4% relativní polohy maxim a minim. Relativní intenzity maxim a minim se liší s maximální odchylkou 54,7%.

SG1097, které dosáhlo měrného útlumu okolo 8dB/km při 1550nm. Vidové pole odpovídá návrhu s maximální odchylkou 19,6% relativní polohy maxim a minim. Relativní intenzity maxim a minim se liší s maximální odchylkou 70,5%.

Literatura

- [1] PETERKA, Pavel; MATĚJEC, Vlastimil. Optická vlákna se dočkala Nobelovy ceny za fyziku. ústav fotoniky a elektroniky : Pokroky matematiky, fyziky a astronomie [online]. 2010, 55, [cit. 2011-10-08]. Dostupné z WWW: http://www.ufe.cz/docs/articles/peterka_matejec_nobelova_cena_vlakna.pdf.
- [2] JAVŮREK, Karel. Rekord v propustnosti přes jeden optický kabel dosáhl 100 Tb/s. Zive.cz [online]. 2. 5. 2011, x, [cit. 2011-10-08]. Dostupné z WWW: <http://www.zive.cz/bleskovky/rekord-v-propustnosti-pres-jeden-opticky-kabel-dosahl-100-tbs/sc-4-a-156909/default.aspx>
- [3] VAŠINEK, CSC, Prof.RNDr.Vladimír. Optoelektronika 1. In Optoelektronika 1 [online]. Ostrava : [s.n.], 2010 [cit. 2011-10-07]. Dostupný z WWW: kat454.vsb.cz/download/predmety/oe/oe1_prednasky.zip.
- [4] ZBOŘIL, Ondřej. Svařování atypických optických vláken. Ostrava, 2010. Bakalářská práce. VŠB – Tech. univerzita Ostrava.
- [5] GLOGE, D. Weakly guiding fibers. Applied Optics. 10, 1971, p.2252-2258. [cit. 2012-02-07]. Dostupné z WWW: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.10.002252>.
- [6] LOPÉZ-HIGUERA, J. M.: *Handbook of optical fibersensing technology*. John Wiley and sons, Ltd. (2002), ISBN 0-471-82053-9.
- [7] HANÁČEK, František, Jan LÁTAL, Petr KOUDELKA, Jan SKAPA, Petr ŠIŠKA, Jan HURTA a Vladimír VAŠÍNEK. VLÁKNOVĚ OPTICKÝ SENZOR PRO VYSOKÉ TEPLoty. Advances in electrical and electronic engineering. 2010, vol. 8, no. 1, p. 6-9. [cit. 2012-02-07]. Dostupné z WWW: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/84152>
- [8] BALON, RADEK. MĚŘÍCÍ METODY KLÍČOVÝCH PARAMETRŮ V OPTICKÝCH SÍTÍCH [online]. Brno, 2010. 82 s. Diplomová práce. VUT BRNO. [cit. 2012-02-07]. Dostupné z WWW: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27181.
- [9] P. Koudelka, J. Látal, P. Šiška, F. Hanáček, J. Skapa, V. Vašinek, STUDIUM SENZORICKÝCH VLASTNOSTÍ KVAZIJEDNOVIDOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN Advances in electrical and electronic engineering. 2010, vol. 8, no. 1, p. 1-5. [cit. 2012-02-07]. Dostupné z WWW: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/83881?show=full>.
- [10] ŠIŠKA, Petr. *Studium a modelování módové vazby v optických vláknech v blízkosti normalizované frekvence*. Ostrava, 2008. Disertační práce. VŠB – Tech. univerzita Ostrava.
- [11] [Http://www.barbarycoastdivers.net](http://www.barbarycoastdivers.net). The telecom industry is on notice after Asian quakes sever deep-sea cables [online]. 2006 [cit. 2012-02-08]. Dostupné z WWW: <http://www.barbarycoastdivers.net/2007/3mar/p4.htm>
- [12] MARCUSE, D.: *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. 2nd. edition, Academic Press, Inc. (1991), ISBN 0-12-470951-6.

-
- [13] NOVOTNÝ KAREL: Optická komunikační technika. ČVUT: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01640-0.
- [14] ELCOM EDUCATION. *Optická vlákna a telekomunikace*. Praha 2: Elcom Education, 1993. ISBN 80-900721-4-3.
- [15] Djafar K. MYNBAEV a Lowell L. SCHEINER. *Fiber-Optic Communication Technology*. New Jersey: Prentice-Hall, 2001. ISBN 0-13-962069-9.
- [16] JUNG, S.P, K.G. LEE, C.H. JUNG, J.H. LEE, E.S. SON, J.W. CHAE a Y.C. CHUNG. Quasi Single-Mode Fiber for the Cost-Effective Implementation of Broadband Access Networks. *Korea Advanced Institute of Science and Technology Department of Electrical Engineering*. 2007(č. 1), 3. Dostupné z: <http://optolab.kaist.ac.kr/publication/ic161.pdf>
- [17] ROUNDY, Carlos B. *Current Technology of Laser Beam Profile Measurements* [online]. Logan, [cit. 2012-02-09]. Dostupné z: <http://aries.ucsd.edu/LMI/TUTORIALS/profile-tutorial.pdf>. Manuál. Spiricon, Inc.
- [18] JUST, Radim. *Možnosti měření profilu optického svazku*. Ostrava, 2011. Diplomová práce. VŠB-Tech. univerzita Ostrava.
- [19] MARCIEJ KUCHARSKI, PAVEL DUBSKÝ. Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras. Praha, 1998, MIKROKOM
- [20] MARŠÁLEK, Leoš. *Vizualizace modových poli v blízkosti normalizované frekvence*. Ostrava, 2007. Teze ke SZZ. VŠB - Tech. univerzita Ostrava.
- [21] VAŠÍNEK, Vladimír. *Optoelektronika*. Ostrava: VŠB-TUO, 1990. ISBN 80-7078-054-1.

Seznam příloh

- /fotografie/ - Obsahuje fotografie z měření, vyfocené datasheety
- /manuály, software, drivery/ - Obsahuje manuály přístrojů, drivery a software Tsviiew
- /matlab scripty/ - Obsahuje scripty pro všechny typy grafů + workspaces pro Matlab
- /měření/preformy/ - Obsahuje grafy některých preforem
- /měření/útlum/ - Naměřené hodnoty metodou 1C a OTDR + grafy
- /měření/reprodukovatelná měření/ - Naměřené hodnoty z reprodukovatelného měření (Optický svazek, Vidové pole) + grafy